

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H02389

研究課題名(和文)電気磁気効果に基づく局所磁化反転とTbit/inch²級超高密度記録への展開

研究課題名(英文) Magnetoelectric effect based magnetization reversal towards high-density magnetic storage

研究代表者

中谷 亮一 (Nakatani, Ryoichi)

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：60314374

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、一部の反強磁性絶縁体において現れる電気磁気効果を利用して、超高密度磁気記録に向けた、反強磁性スピンの電界誘起反転の実現、ならびに、その原理を解明することを主眼とした。本課題は、Cr203薄膜における電気磁気効果の発現をスタートとして、主として、以下の成果を得た。(1) 強磁性層/Cr203層積層膜における電気磁気効果による等温可逆強磁性磁化反転の実現と反転エネルギーの解釈、(2) 電気磁気効果を駆動力とする反強磁性磁区(ドメイン)反転プロセスの解明、(3) 強磁性層/Cr203層積層膜における交換磁気異方性発現機構の解明、(4) 電気磁気効果を発現するCr203薄膜の低膜厚化

研究成果の学術的意義や社会的意義

自発磁化やスピン偏極を示す強磁性体とは異なり、反強磁性体は従来、スピンの制御不能な物質とされてきた。本研究課題では、電気磁気効果と呼ばれる結晶構造とスピン構造による電界と磁気分極の交差相関を利用することで、反強磁性スピンや反強磁性磁区(ドメイン)が制御可能な機能であることを実証した。また、反強磁性ドメインのマーカートとなる強磁性ドメインを反強磁性ドメインに追隨して反転させることができること、その反転機構やダイナミクスなどを実験的に明らかにすることで、この技術を学術分野にとどまらず、磁気メモリや超高密度磁気記録に向けた基盤技術への展開が可能になったものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this project, we focused on the magnetoelectric induced antiferromagnetic spin/domain reversal and the elucidation of the microscopic mechanism toward the high-density magnetic storage as a final goal. Starting from the realization of the magnetoelectric effect in Cr203 thin film, we developed this to the following main results; (1) Realization of isothermal and reversible switching of ferromagnetic magnetization, which is a marker of the magnetoelectric antiferromagnetic domain/spin, and elucidation of the switching energy condition, (2) Switching process of the antiferromagnetic domain driven by the magnetoelectric effect, (3) Mechanism of high perpendicular exchange bias in ferromagnetic layer/Cr203 layer stacking, (4) Reduction of Cr203 layer thickness exhibiting the magnetoelectric effect

研究分野：磁性薄膜、磁気記録

キーワード：電気磁気効果 スピン Cr203 磁気記録

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ハードディスクドライブ (Hard Disk Drive: HDD) に代表される磁気記憶装置は、大容量情報記憶に必須の装置であり、特に、情報の長期安定性、書込・読出回数などの点において、他に類を見ない有意性を有している。HDD の記録容量は年々増加傾向にあるが、その記憶密度は、2000 年代初頭までに線記録密度の飛躍的な増加を遂げた後、現在は従来の上昇率を保つことが困難になっている。これは、磁気記録密度の上昇が磁気記録媒体となる磁性ナノ粒子の微細化によるところが大きく、この手法の延長では、いわゆる、磁化の熱揺らぎ (超常磁性限界) を迎えることにある。一方、超常磁性限界の回避には、記録媒体となる磁性ナノ粒子の磁気異方性エネルギーの上昇が必要であるが、この場合には、情報記録に必要な磁場が磁気ヘッドから発生できる磁場を超えることが指摘されている。こうした、いわゆる、トリレンマ問題を回避するための手法として、熱アシスト磁気記録、マイクロ波アシスト磁気記録などのエネルギーアシスト型磁気記録システムが提案されている。これらの手法はいずれも、情報記録として磁場を用いることは従来手法の踏襲であり、また、熱やマイクロ波などのアシスト場の生成のために、情報書き込みに必要なエネルギー (電力) の上昇が懸念される。こうした状況において、トリレンマ問題を回避でき、さらに、低消費電力性も兼ね備えた新奇な磁気記録システムの実現が切望されている。

2. 研究の目的

我々は、情報記録方法として電界を利用した新奇な方法での磁化反転技術の開発を進めてきた。特に、一部の絶縁性反強磁性体において現れる「電気磁気効果」と呼ばれる電場と磁気分極 (あるいは磁場と誘電分極) の交差相関を利用した磁化反転手法の開発を進めており (図 1)、中でも Cr_2O_3 薄膜における電気磁気効果の発現と界面交換結合を介した強磁性層への伝搬に関して、世界に先駆けた成果を創出してきた。(例えば、K. Toyoki (研究分担者), R. Nakatani (研究代表者) et al., Applied Physics Express, Vol. 7, pp. 114201 (2014).) 本研究課題では、この技術を上記の超高密度磁気記録への基盤技術として発展させることを目標として、特に、下記の点に焦点を当てて研究を行った。

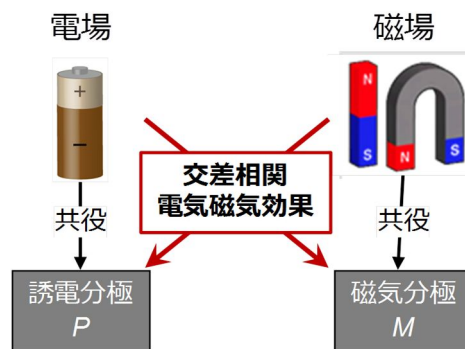


図 1 磁場と電場による交差相関

- (1) 電気磁気効果を駆動力とする磁化反転エネルギーの解釈
- (2) 強磁性層 / Cr_2O_3 層界面の交換磁気異方性 (反強磁性磁区情報を強磁性層に転写する原理) の微視的メカニズム
- (3) 強磁性層 / Cr_2O_3 層における電気磁気効果誘起磁化反転の低膜厚領域での実現
- (4) 電気磁気効果による反強磁性磁化反転プロセスの解明

3. 研究の方法

磁気記憶を始めとする電子デバイスへの応用には、磁気機能を担う磁性材料を薄膜化することが必須であり、このため、本研究では DC 反応性スパッタリング法を用いて、以下の構成を主とした薄膜作製を行った。

Pt(1-3 nm)/Co(0.4-0.7 nm)/Au(0.5-1.0 nm)/ Cr_2O_3 (50-250 nm)/Pt(20 nm)/substrate

本研究で主眼とする電気磁気効果は、上記の通り、スピン構造と結晶構造によって発現するため、試料作製段階において、反射高速電子線回折法 (Reflection High-energy electron diffraction: RHEED), X 線回折法 (X-ray diffraction: XRD) によって Cr_2O_3 層の結晶構造と結晶配向性を確認している。電気磁気効果の検出には、 Cr_2O_3 層に電界を印加する必要がある。上記の試料構成の内、Pt(20 nm) は、 Cr_2O_3 層の結晶配向性を制御するためにバッファ層とともに、電界印加のための電極層としても利用する。Pt/Co/Au 層は、電界制御された Cr_2O_3 層の反強磁性スピン / 磁区の情報に Cr_2O_3 層との界面交換結合を介して検出するための強磁性層であり、 Cr_2O_3 層に電界を印加するための上部電極としても利用する。なお、Au 層は、 Cr_2O_3 層と Co 層の界面交換結合を適切な値に調整するためのスペーサ層である。(本研究課題での成果: Y. Shiratsuchi (研究分担者), R. Nakatani (研究代表者) et al., Journal of Applied Physics, Vol. 121, pp. 073901 (2017).) 作製した薄膜を電気磁気効果計測のために、

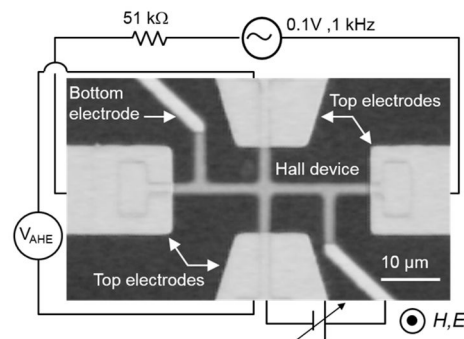


図 2 電気磁気効果計測に用いた Hall 素子の光学顕微鏡像と測定系の回路図 [Copyright American Institute of Physics 2018. T.V.A. Nguyen, R. Nakatani et al., J. Appl. Phys. 122, 073905 (2017).]

図2に示すマイクロHall素子に微細加工した(ただし,図2に示す素子は代表的な構造).微細加工には,フォトリソグラフィ法,Arイオンミリング法を用いた.図には,電気磁気効果計測のための電気回路図も示した.電気磁気効果の検出は,主として,電場と磁場の同時印加後,ゼロ電場における異常ホール効果計測により行い,交換バイアス極性の電界による変化を主として検出することとした.

電気磁気効果による反強磁性(Cr_2O_3)磁区,ならびに, Cr_2O_3 層と交換結合した強磁性(Co)磁区の反転プロセスについては,磁気光学Kerr効果(Magnet-optic Kerr effect: MOKE)顕微鏡,および,放射光を用いた走査型軟X線磁気二色性(X-ray magnetic circular dichroism: XMCD)顕微鏡を用いて行った.なお,走査型XMCD顕微鏡観察は,大型放射光施設SPring-8 BL25SUに設置された設備を用いた.(課題番号2016A0079など)

4. 研究成果

以下に,本研究で得られた主な成果をまとめる.電気磁気効果を駆動力とする磁化反転方式には,主として(A)等温反転法,(B)電気磁気冷却法がある.以下では,(1),(2)において,それぞれ,(A),(B)に対する磁化反転エネルギーの解釈についての成果を記し,(3)においては,磁化反転エネルギーの障壁となる要因の一つである界面交換磁気異方性の主因について得られた結果を記す.(4)においては,(B)の反転手法における磁化反転プロセスに関する成果を記す.

(1) 等温反転法における磁化反転エネルギーの解釈

等温反転法における磁化反転エネルギーの評価は,交換バイアスの極性が反転する(反強磁性層と交換結合した強磁性層がゼロ磁場状態で磁化反転する)際の閾電場の磁場依存性を基に行った.

図3にPt(1.2 nm)/Co(0.4 nm)/Au(0.5 nm)/ Cr_2O_3 (150 nm)/Pt(20 nm)積層膜に対して,285 Kにおいて測定した交換バイアスの極性反転電場の磁場依存性を示す.[T.V.A. Nguyen, R. Nakatani (研究代表者) et al., Journal of Applied Physics, Vol. 122, pp. 233902 (2018).]

交換バイアス極性反転の閾電場は,印加磁場の逆数に比例して直線的に変化する.これは,電気磁気効果によるエネルギー利得が,電場×磁場に比例することで説明できる.一方,図の中間領域(上下の直線の間の領域)は,正負の交換バイアスが双安定状態にある領域である.

双安定状態は,交換バイアスの極性反転にエネルギー障壁があることを意味する.交換バイアスの極性反転のエネルギー障壁を現象論的に解釈し,図3に示した直線の傾き(交換バイアス反転の本質的なエネルギー障壁)と $1/H \rightarrow 0$ への極限值(オフセット)を用いて定量的に評価した.図3に示した直線の傾きで示されるエネルギー障壁は, Cr_2O_3 層の結晶磁気異方性エネルギー($K_{\text{Cr}_2\text{O}_3}$)と界面交換結合に起因する交換磁気異方性エネルギー($J_{\text{INT}}/t_{\text{Cr}_2\text{O}_3}$)の和で表される.後者は, Cr_2O_3 層の膜厚に依存するため,エネルギー障壁の Cr_2O_3 膜厚依存性を基に,交換バイアス極性反転のエネルギー障壁の主因を明らかにすることができる.その結果,エネルギー障壁(図3の直線の傾き)は, Cr_2O_3 膜厚の低下とともに上昇し,式(1)に基づくフィッティングの結果, $K_{\text{Cr}_2\text{O}_3} = (4.5 \pm 0.6) \times 10^3 \text{ J/m}^3$, $J_{\text{INT}} = (1.5 \pm 0.2) \times 10^{-2} \text{ mJ/m}^2$ と見積もられ, Cr_2O_3 膜厚がデバイス応用に求められる数100 nm以下の領域では,界面交換結合に起因するエネルギー障壁が支配因子となることを明らかにした.

オフセット電場の起源については, Cr_2O_3 層内部の欠陥由来の非補償反強磁性モーメントと結晶場との結合,強磁性層/ Cr_2O_3 層界面における界面非補償反強磁性モーメントが予測されるが,この場合も,オフセット電場の Cr_2O_3 膜厚依存性を基に支配因子の検討が可能である.その結果,前者に起因する反強磁性モーメントは $(3.8 \pm 2.5) \times 10^{-5} \text{ Wb/m}^2$ 以下でありほぼ無視できることに対して,後者に起因する磁気モーメントは約 $0.36 \pm 0.07 \mu_B/\text{Cr}$ となり,以前にXMCD測定によって明らかにした結果[Y. Shiratsuchi (研究分担者) et al., Physical Review Letters, Vol. 109, pp. 077202 (2012).]とほぼ一致する.以上の結果から,電気磁気効果を駆動力とする交換バイアス極性反転のエネルギー障壁は,強磁性層との界面交換結合が主要因であることを明らかにした.

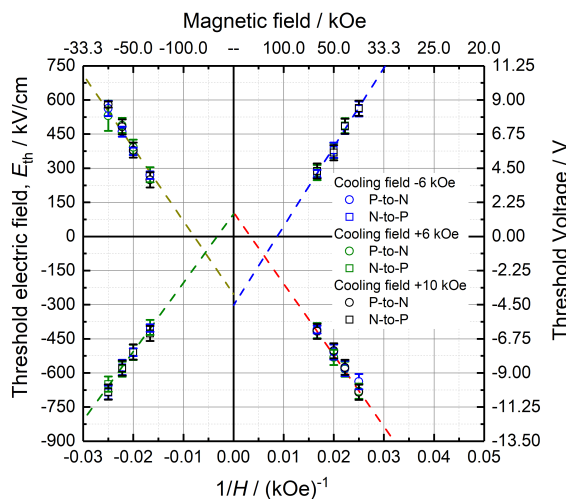


図3 交換バイアスの極性反転電場の磁場依存性. [Copyright American Institute of Physics 2018. T.V.A. Nguyen, R. Nakatani et al., J. Appl. Phys. 122, 073905 (2017).]

(2) 強磁性層 / Cr₂O₃ 層における電気磁気効果誘起磁化反転の低膜厚領域での実現と反転エネルギー

上記のように、電気磁気効果を駆動力とする反強磁性ドメイン反転には、前節でしめした等温反転法とともに、電気磁気冷却法がある。本節では、電気磁気冷却法による交換バイアス極性反転エネルギーについて検討した結果を記す。(1)と同様に、交換バイアス極性反転閾電場の磁場依存性を測定した結果を、図4に示す。[Y. Shiratsuchi (研究分担者), R. Nakatani (研究代表者) et al., Applied Physics Express, Vol. 13, pp. 043003 (2020).]なお、図4(a)に示した結果は、Cr₂O₃膜厚を50 nmとした場合の結果であり、このCr₂O₃膜厚は強磁性層 / Cr₂O₃層積層膜における電気磁気効果誘起交換バイアス反転として、現時点で世界最小値である。等温反転法とは異なり、電気磁気冷却法においては、電場×磁場の符号が正の場合にのみ、交換バイアスの極性反転が生じる。交換バイアス磁場がゼロとなる電場を閾電場として定義すると、閾電場の磁場依存性(図4(b))は、等温反転法と同様に磁場の逆数(1/H)に比例する。一方、印加磁場を8 Tまで上昇させると閾電場が上昇しているが、これは、印加磁場がCr₂O₃層のスピンフロップ磁場に近づくことで電気磁気効果係数が低下することによる。図4(b)の傾きから算出される交換バイアスの極性反転に必要なエネルギーのは、電気磁気冷却法においても等温反転法と同様に、Cr₂O₃膜厚の低下とともに上昇し、エネルギー障壁が強磁性層とCr₂O₃層界面での交換結合が主因であることを示唆する。

一方、エネルギー障壁は、50 nm膜厚においても200 nm以上の高膜厚領域での測定値と同一の現象論的表記で記述できることを明らかにした。このことは、例えば、BiFeO₃などのマルチフェロイック材料においては、低膜厚領域において基板拘束による歪効果のために、交差相関係数が低下することと対照的であり、Cr₂O₃薄膜における電気磁気効果の発現には、さらなる低膜厚化が可能であることを示唆する結果である。

(3) 強磁性層 / Cr₂O₃ 層界面の交換磁気異方性(反強磁性磁区情報を強磁性層に転写するメカニズム)の微視的メカニズム

上記の(1),(2)に示したように、電気磁気効果を駆動力とする交換バイアス極性反転のエネルギー障壁は、強磁性層 / Cr₂O₃層界面における交換磁気異方性エネルギーが主因である。一方、デバイスの低消費電力動作のためには、磁化反転のエネルギー障壁を低下させることが必要である。本項目では、エネルギー障壁の主因となる強磁性層 / Cr₂O₃積層膜における交換磁気異方性の微視的機構を明らかにした結果について記す。

本課題での主要な構成要素であるPt/Co/Cr₂O₃積層膜において、Cr₂O₃層の結晶性(単結晶、双晶など)によって変化し、双晶薄膜を用いた場合には、交換磁気異方性エネルギーが4倍以上となることを明らかにした。[Y. Shiratsuchi (研究分担者), R. Nakatani (研究代表者) et al., Journal of Applied Physics, Vol. 123, pp. 103903 (2018).]また、Cr₂O₃層を(0001)配向膜として膜面内方向の結晶方位を多結晶化した場合には、双晶と比較して交換磁気異方性エネルギーが低下すること、ならびに、交換磁気異方性の強度変化はCr₂O₃層の下地層となるPt層による格子歪によっては説明できず、同一下地層(V₂O₃層)を用いた場合でも同様の変化が生じることも見出した。この結果は、強磁性層 / Cr₂O₃層積層膜における交換磁気異方性の原因となるスピン配列が、双晶界面による本質的な効果であることを示唆する。

Cr₂O₃(0001)薄膜における双晶界面は[11*0]に生成される。図5に、単結晶Cr₂O₃、ならびに、[11*0]双晶Cr₂O₃における原子配列、ならびに、スピン配列を示す。[Y. Shiratsuchi (研究分担者), R. Nakatani (研究代表者) et al., Material Transactions, Vol. 60, pp. 2028 (2019).]単結晶Cr₂O₃においてはスピン配列は反平行配列を保つことに対して、[11*0]双晶界面においては、原子間配列と原子間距離の変化により、双晶界面上でCr³⁺イオンによる三角格子が生成し、結果として、三角格子上でのスピンのフラストレーションが生じる可能性がある。反強磁性層におけるフラストレートしたスピン配列は、高い交換磁気異方性の期限となりえることが理論的に示されており、このことから、双晶Cr₂O₃層における高い交換磁気異方性はこうした効果の結果で

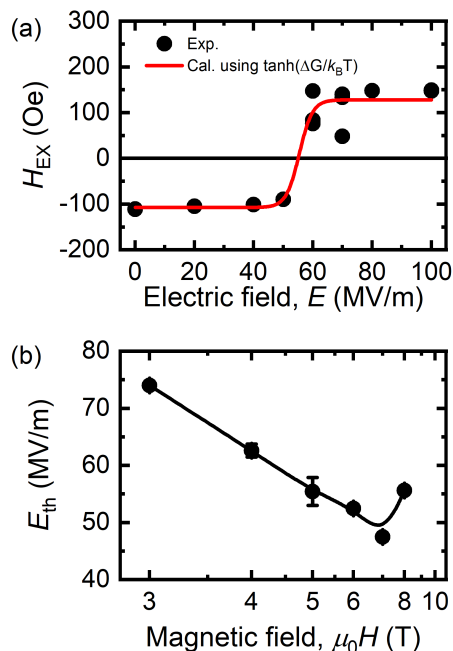


図4 (a) 電気磁気冷却過程における電場強度に対する交換バイアス磁場の変化, (b) 交換バイアスの極性反転閾電場の磁場依存性. [Copyright Institute of Physics 2020. Y. Shiratsuchi, R. Nakatani et al., Appl. Phys. Express, 13, 043003 (2020).]

あると考えられる。今後、電気磁気効果を利用した磁化反転エネルギーの低下には、双晶界面によるスピンフラストレーションを解消しつつ、高い交換磁気異方性を発現できる異なるメカニズムの生成（例えば、結晶粒の微細化による磁化反転モードの変化）などについて検討を進める必要がある。

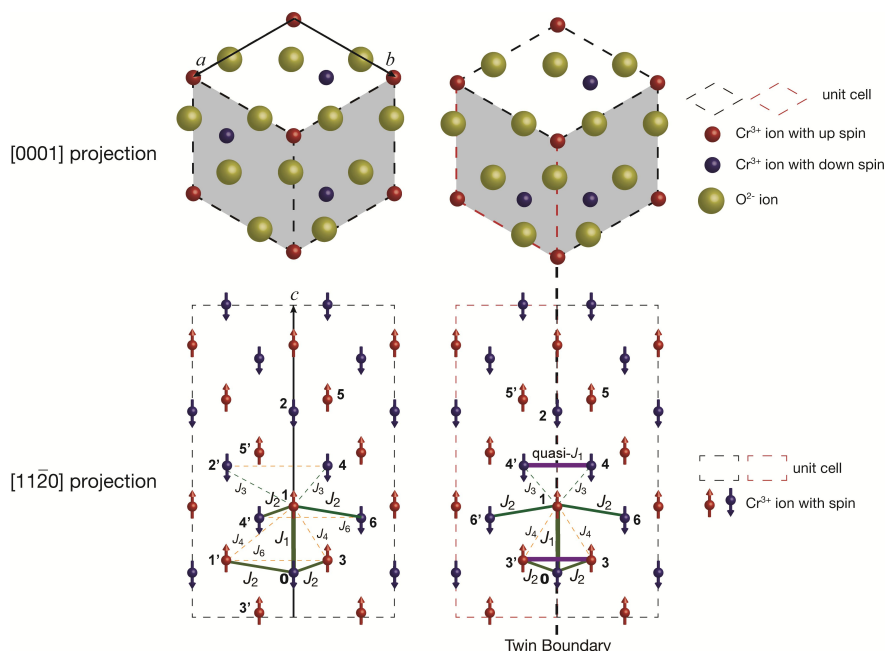


図5 単結晶（左図），および， $[11^*0]$ 双晶（右図） Cr_2O_3 の原子配列とスピン配列．上段は， $[0001]$ 投影図，下段は $[11^*0]$ 投影図を表す．(Copyright 日本金属学会，Y. Shiratsuchi, R. Nakatani et al., Mater. Trans. 60, 2028 (2019).)

(4) 電気磁気効果による反強磁性磁化反転プロセスの解明

等温反転法における反強磁性層の磁化（スピン）反転過程は，(1)に示した結果をもとに，通常の強磁性体と同様に逆磁区生成と磁壁移動によって生じることを明らかにした．[Y. Shiratsuchi（研究分担者），R. Nakatani（研究代表者）et al., Applied Physics Letters, Vol. 113, pp. 242404 (2018). など]電気磁気冷却法による交換バイアス極性の反転プロセスについては，この過程が(2)図4(b)から熱活性による確率過程であることが推察されるため，その詳細については，直接的な磁区構造の観察が必須である．本研究では，本検討を可能にするために，強磁場（1.5 T），電界印加，温度制御が可能な極 MOKE 顕微鏡を開発した．本項目では，開発した装置によって観察した電気磁気冷却法による交換バイアス極性反転過程を示す．

図6に，1.5 Tの磁場と様々な強度の電場を同時印加しながら冷却した後の磁区像を示す．明るい領域と暗い領域はそれぞれ，負と正の交換バイアスを示す領域に対応する．冷却時の電場の上昇とともに，暗い領域が増加することがわかる．暗い領域（正の交換バイアス領域）の生成箇所は，視野内でほぼランダムに生成しているものと考えられる．また，図中の○印で示したように，弱電場で核生成した磁区が再度消失する現象も観察される．この現象は，印加電場が閾値付近の場合にはより顕著に観察され，上述した電気磁気冷却法による各生成過程が熱活性化による確率過程によることと一致する．

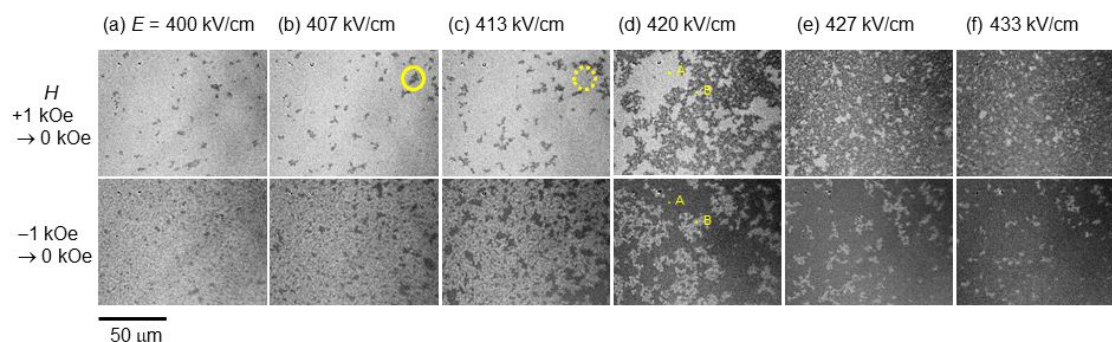


図6 電気磁気冷却後の残留磁化状態における磁区像．上段は+1 kOeの磁場印可後，下段は-1 kOeの磁場印可後の磁区像を表す．(Y. Shiratsuchi, R. Nakatani et al., AIP Advances, 8, 125313 (2019).)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計21件（うち査読付論文 20件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Shiratsuchi Yu, Yoshida Hiroaki, Kotani Yoshinori, Toyoki Kentaro, Nguyen Thi Van Anh, Nakamura Tetsuya, Nakatani Ryoichi	4. 巻 6
2. 論文標題 Antiferromagnetic domain wall creep driven by magnetoelectric effect	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 APL Materials	6. 最初と最後の頁 121104 ~ 121104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5053928	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shiratsuchi Yu, Watanabe Shunsuke, Yonemura Shogo, Shibata Tatsuo, Nakatani Ryoichi	4. 巻 8
2. 論文標題 Frustration and relaxation of antiferromagnetic domains reversed by magneto-electric field cooling in a Pt/Co/Au/Cr203/Pt-stacked film	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 125313 ~ 125313
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5053136	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shiratsuchi Yu, Watanabe Shunsuke, Yoshida Hiroaki, Kishida Noriaki, Nakatani Ryoichi, Kotani Yoshinori, Toyoki Kentaro, Nakamura Tetsuya	4. 巻 113
2. 論文標題 Observation of the magnetoelectric reversal process of the antiferromagnetic domain	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 242404 ~ 242404
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5053925	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 Nguyen Thi Van Anh, Shiratsuchi Yu, Yonemura Shogo, Shibata Tatsuo, Nakatani Ryoichi	4. 巻 124
2. 論文標題 Energy condition of isothermal magnetoelectric switching of perpendicular exchange bias in Pt/Co/Au/Cr203/Pt stacked film	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 233902 ~ 233902
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5047563	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 Shiratsuchi Y., Nguyen T. V. A., Nakatani R.	4. 巻 42
2. 論文標題 Magnetoelectric Control of Antiferromagnetic Domain of Cr2O3 Thin Film Toward Spintronic Application	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Magnetism Society of Japan	6. 最初と最後の頁 119 ~ 126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3379/msjmag.1811R001	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 Shiratsuchi Yu, Nakano Yuuta, Inami Nobuhito, Ueno Tetsuro, Ono Kanta, Kumai Reiji, Sagayama Ryoko, Nakatani Ryoichi	4. 巻 123
2. 論文標題 Determination of specific ion positions of Cr3+ and O2- in Cr2O3 thin films and their relationship to exchange anisotropy at Co/Cr2O3 interfaces	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 103903 ~ 103903
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5020620	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 Nguyen Thi Van Anh, Shiratsuchi Yu, Kobane Atsushi, Yoshida Saori, Nakatani Ryoichi	4. 巻 122
2. 論文標題 Magnetic field dependence of threshold electric field for magnetoelectric switching of exchange-bias polarity	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 073905 ~ 073905
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.1063/1.4991053	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 Thi Van Anh Nguyen, Yu Shiratsuchi, and Ryoichi Nakatani	4. 巻 10
2. 論文標題 Pulse-voltage-driven dynamical switching of perpendicular exchange bias in Pt/Co/Au/Cr2O3/Pt thin film	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 083002 ~ 083002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.7567/APEX.10.083002	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 Thi Van Anh Nguyen, 白土 優, 中谷亮一	4. 巻 117
2. 論文標題 電気磁気効果を利用した垂直交換バイアス反転とそのダイナミクス	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 信学技報 (IEICE Technical Report)	6. 最初と最後の頁 41 ~ 47
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Shiratsuchi Yu, Nakatani Ryoichi	4. 巻 57
2. 論文標題 Perpendicular Exchange Bias and Magneto-Electric Control Using Cr2O3(0001) Thin Film	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Materials Transaction	6. 最初と最後の頁 781 ~ 788
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.ME201506	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 Shiratsuchi Yu, Kuroda Wataru, Nguyen Thi Van Anh, Kotani Yoshinori, Toyoki Kentaro, Nakamura Tetsuya, Suzuki Motohiro, Nakamura Kohji, Nakatani Ryoichi	4. 巻 121
2. 論文標題 Simultaneous achievement of high perpendicular exchange bias and low coercivity by controlling ferromagnetic/antiferromagnetic interfacial magnetic anisotropy	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 073902 ~ 073902
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4976568	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 Yu Shiratsuchi, Saori Yoshida, Satoshi Onoue, Chiharu Mitsumata, Nobuhito Inami, Tetsuro Ueno, Kanta Ono and Ryoichi Nakatani	4. 巻 60
2. 論文標題 Enhancement of perpendicular exchange bias by introducing twin boundary in Pt/Co/ -Cr2O3/ -V2O3 epitaxial film	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Materials Transactions	6. 最初と最後の頁 2028-2032
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MT-M2019102	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 Yu Shiratsuchi, Daisuke Tokunaga and Ryoichi Nakatani	4. 巻 59
2. 論文標題 Regeneration of perpendicular exchange bias in high temperature regime in Pt/Co/Au/Cr203/Pt stacked films	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SEEF02 - SEEF02
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.35848/1347-4065/ab6a2a	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 Thi Van Anh Nguyen, Yu Shiratsuchi, Hideo Sato, Shoji Ikeda, Tetsuo Endoh, and Yasushi Endo	4. 巻 19
2. 論文標題 Magnetic properties of Co film in Pt/Co/Cr203/Pt structure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 015152-015152
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1063/1.5130439	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yu Shiratsuchi, Motohiro Suzuki, Kentaro Toyoki, Kohei Wakatsu, Takashi Nishimura, Tetsuya Nakamura and Ryoichi Nakatani	4. 巻 583
2. 論文標題 Critical behavior of perpendicular exchange bias in Pd/Co/Pt/Cr203/Pd stacked films	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physica B: Physics of Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 412052-412052
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.physb.2020.412053	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 Yu Shiratsuchi, Kentaro Toyoki, Tao Yiran, Hikaru Aono and Ryoichi Nakatani	4. 巻 13
2. 論文標題 Realization of magnetoelectric effect in 50-nm-thick Cr203 thin film	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 043003-043003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.35848/1882-0786/ab7bcc	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 Takahiro Moriyama, Yu Shiratsuchi, Tatsuya Iino, Hikaru Aono, Motohiro Suzuki, Tetsuya Nakamura, Yoshinori Kotani, Ryoichi Nakatani, Kohji Nakamura, and Teruo Ono	4. 巻 13
2. 論文標題 Giant anomalous Hall conductivity at Pt/Cr2O3 interface	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 034052-034052
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.13.034052	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 Yu Shiratsuchi, Saori Yoshida, Hiroaki Yoshida, Yoshinori Kotani, Kentaro Toyoki, Chiharu Mitsumata, Ryoichi Nakatani and Tetsuya Nakamura	4. 巻 127
2. 論文標題 Robust magnetic domain in Pt/Co/Au/Cr2O3/Pt stacked film with perpendicular exchange bias	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 153902-153902
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1063/5.0002240	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 Yu Shiratsuchi	4. 巻 2019
2. 論文標題 Observation of antiferromagnetic domain reversal driven by magneto-electric effect using scanning soft X-ray magnetic circular dichroism microscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SPRING-8/SACLA Research Frontiers 2019	6. 最初と最後の頁 in-press
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 白土優	4. 巻 24
2. 論文標題 スピントロニクスデバイスを基盤としてナノ磁気計測技術の開発と物質・材料研究への展開	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 SPRING-8利用者情報	6. 最初と最後の頁 98-103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

[学会発表] 計42件(うち招待講演 16件/うち国際学会 21件)

1. 発表者名 Kentaro Toyoki, Yu Shiratsuchi, Hiroaki Yoshida, Shunsuke Watanabe, Yoshinori Kotani, Tetsuya Nakamura and Ryoichi Nakatani
2. 発表標題 Magneto-electric driven antiferromagnetic domain reversal and domain wall dynamics
3. 学会等名 63th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (2019 MMM) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T.V.A Nguyen, Y. Shiratsuchi, H. Sato, S. Ikeda, T. Endoh and Y. Endo
2. 発表標題 Dynamic magnetic property in Pt/Co/Cr2O3/Pt stack films with perpendicular magnetic anisotropy
3. 学会等名 63th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (2019 MMM) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yu Shiratsuchi, Daisuke Tokunaga and Ryoichi Nakatani
2. 発表標題 High-temperature regeneration of perpendicular exchange bias in Pt/Co/Au/Cr2O3/Pt stacked films
3. 学会等名 Magnetic and Optics Research International Symposium (MORIS) 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yu Shiratsuchi
2. 発表標題 Dynamic control of magnetic domain state of magnetoelectric antiferromagnet
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yu Shiratsuchi
2. 発表標題 Dynamic magnetoelectric control of Cr2O3 domain
3. 学会等名 The 13th Pasific Rim Conference of Ceramic Societies (PacRim13) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yu Shiratsuchi
2. 発表標題 Antiferromagnetic domain control by magnetoelectric effect
3. 学会等名 The 10th Pasific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing (PRICM10) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. V. Anh Nguyen, Yu Shiratsuchi, Yasushi Endo, Hideo Sato, Shoji Ikeda, Tetsuo Endoh, and Ryoichi Nakatani
2. 発表標題 Magnetoelectric effect in Cr2O3 for electric field induced switching of interfacial magnetization in exchange biased films
3. 学会等名 Seminar on synthesis and characterzation of functional oxides for nonvoltage memory devices (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yu Shiratsuchi, Shunsuke Watanabe and Ryoichi Nakatani
2. 発表標題 Observation of reversal process of perpendicular exchange bias during magnetoelectric field cooling
3. 学会等名 International Conference on Magnetism 2018 (ICM2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yu Shiratsuchi, Thi Van Anh Nguyen, Yoshinori Kotani, Kentaro Toyoki, Tetsuya Nakamura, and Ryoichi Nakatani
2. 発表標題 Dynamic control of antiferromagnetic domain state by magnetoelectirc effect
3. 学会等名 International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials (Thermec ' 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yu Shiratsuchi, Thi Van Anh Nguyen, Kentaro Toyoki, Yoshinori Kotani, Tetsuya Nakamura, Ryoichi Nakatani
2. 発表標題 Magneto-electric control of antiferromagnetic domain
3. 学会等名 The 5th International Conference of Asian Union of Magnetics Societies (IcAUMS 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 白土 優, 豊木研太郎, 陶 亦然, 青野 晃, 中谷亮一
2. 発表標題 電気磁気効果誘起交換バイアス反転の磁場依存性
3. 学会等名 日本金属学会2020年春季(第166回)講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 白土 優, 豊木研太郎, 陶 亦然, 青野 晃, 中谷亮一
2. 発表標題 50 nm厚Cr2O3薄膜を用いた電気磁気効果誘起交換バイアス反転
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 白土 優, 中谷亮一
2. 発表標題 電気磁気効果を示すCr2O3薄膜を用いた垂直交換磁気異方性の微視的メカニズム
3. 学会等名 大阪大学ナノプラットフォーム地域セミナー(国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 白土 優, 吉田沙織, 尾上聡, 井波暢人, 上野哲朗, 小野寛太, 中谷亮一
2. 発表標題 反強磁性Cr2O3薄膜を用いた垂直交換バイアスに対する双晶粒界の影響
3. 学会等名 日本金属学会2019年秋期(第165回)講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 白土 優
2. 発表標題 走査型軟X線MCD顕微鏡を用いた電気磁気効果誘起磁化反転プロセス
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. V. A. Nguyen, Y. Shiratsuchi, H. Sato, S. Ikeda, T. Endoh, and Y. Endo
2. 発表標題 12. Magnetic damping in Pt/Co/Cr2O3/Pt stack films with perpendicular magnetic anisotropy
3. 学会等名 2019年第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 白土 優, 徳永大将, 中谷亮一
2. 発表標題 Pt/Co/Au/Cr2O3/Pt積層膜における垂直交換バイアスの高温再発現現象
3. 学会等名 日本金属学会2019年春季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. V. A. Nguyen, Y. Shiratsuchi, S. Yonemura, T. Shibata, Y. Endo, R. Nakatani
2. 発表標題 Temperature dependence of magnetoelectric switching condition of perpendicular exchange bias
3. 学会等名 2018年第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 白土 優, 渡邊俊介, 米村祥吾, 中谷亮一
2. 発表標題 Pt/Co/Au/Cr2O3/Pt積層膜における電気磁気冷却による垂直交換バイアス反転過程
3. 学会等名 第42回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yu Shiratsuchi, Shunsuke Watanabe and Ryoichi Nakatani
2. 発表標題 Observation of reversal process of perpendicular exchange bias during magnetoelectric field cooling
3. 学会等名 International Conference on Magnetism 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yu Shiratsuchi, Thi Van Anh Nguyen, Yoshinori Kotani, Kentaro Toyoki, Tetsuya Nakamura, and Ryoichi Nakatani
2. 発表標題 Dynamic control of antiferromagnetic domain state by magnetoelectirc effect
3. 学会等名 International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials (Thermec ' 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yu Shiratsuchi, Thi Van Anh Nguyen, Kentaro Toyoki, Yoshinori Kotani, Tetsuya Nakamura, Ryoichi Nakatani
2. 発表標題 Magneto-electric control of antiferromagnetic domain
3. 学会等名 The 5th International Conference of Asian Union of Magnetics Societies (IcAUMS 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yu Shiratsuchi, Thi Van Anh Nguyen, Atsushi Kobane, Saori Yoshida and Ryoichi Nakatani
2. 発表標題 Dynamical magnetoelectric switching of perpendicular exchange bias in Pt/Co/Au/Cr2O3/Pt thin film using pulse voltage
3. 学会等名 62nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yu Shiratsuchi, Thi Van Anh Nguyen, Atsushi Kobane, and Ryoichi Nakatani
2. 発表標題 Magnetic field dependence of threshold electric field for magnetoelectric switching of perpendicular exchange bias
3. 学会等名 62nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yu Shiratsuchi
2. 発表標題 Dynamical magnetoelectric switching of perpendicular exchange bias
3. 学会等名 Asia Pasific Society for Materials Research (APSMR) Annual Meeting 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Thi Van Ahn Nguyen, Yu Shiratsuchi, Syogo Yonemura, Ryoichi Nakatani
2. 発表標題 Antiferromagnetic layer thickness dependence of mangnetoelectric switching condition of perpendicular exchange bias
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 白土 優
2. 発表標題 電気磁気効果による界面反強磁性スピン反転とそのダイナミクス
3. 学会等名 応用物理学会 / 日本磁気学会スピントロニクス専門研究会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Thi Van Anh Nguyen, 白土 優, 中谷亮一
2. 発表標題 Dynamic reversal of perpendicular exchange bias using magnetoelectric effect
3. 学会等名 磁気記録・情報ストレージ研究会 (MR) 研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 渡邊駿介, 白土 優, 岸田憲明, Thi Van Anh Nguyen, 中谷亮一, 小谷佳範, 豊木研太郎, 中村哲也
2. 発表標題 Pt/Co/Au/Cr203/Pt薄膜における電気磁気効果による交換バイアス反転過程
3. 学会等名 日本金属学会2017年秋期(第161回)講演大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 吉田大哲, 白土 優, Thi Van Anh Nguyen, 中谷亮一, 小谷佳範, 豊木研太郎, 中村哲也
2. 発表標題 パルス電圧による交換磁気異方性反転過程の観察
3. 学会等名 日本金属学会2017年秋期(第161回)講演大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 白土 優, 加藤剛志, 鈴木義茂, 三輪真嗣, 野崎隆行, 荒河一渡
2. 発表標題 スピントロニクスデバイスを基盤としたナノ計測技術の開発と物質・材料研究への展開
3. 学会等名 SPring-8シンポジウム2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 白土 優
2. 発表標題 電気磁気効果を利用した電界誘起界面反強磁性スピン反転
3. 学会等名 第3回関西西四国磁性研究会(IEEE Magnetic Society, Japan Council, Kansai/Shikoku Joint Chapter講演会)(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yu Shiratsuchi
2. 発表標題 Dynamical magnetoelectric switching of perpendicular exchange bias
3. 学会等名 The 27th Magnetic Recording Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Ryoichi Nakatani and Yu Shiratsuchi
2. 発表標題 Interfacial spin reversal based on magnetoelectric effect in Pt/Co/Cr203/Pt films
3. 学会等名 9th Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing (PRICM9) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Yu Shiratsuchi, Yoshinori Kotani, Saori Yoshida, Yasunori Yoshikawa, Kentaro Toyoki, Atsushi Kobane, Ryoichi Nanakatani and Tetsuya Nakamura
2. 発表標題 Observation of ferromagnetic and antiferromagnetic domains in perpendicular exchange-biased system using Cr203 thin film
3. 学会等名 9th Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing (PRICM9) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Yu Shiratsuchi
2. 発表標題 Magneto-electric switching of interfacial spins toward magnetic recording/memory
3. 学会等名 International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials (Thermec ' 2016) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 白土 優, Thi Van Anh Nyugen, 小谷佳範, 三俣千春, 中谷亮一, 中村哲也
2. 発表標題 Pt/Co/Au/Cr2O3/Pt垂直交換バイアス膜の磁化緩和過程
3. 学会等名 日本金属学会2017年春期(第160回)大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Thi Van Anh Nyugen, Yu Shiratsuchi, Wataru Kuroda, Yoshinori Kotani, Kentaro Toyoki, Tetsuya Nakamura, Motohiro Suzuki, Kohji Nakamura and Ryoichi Nakatani
2. 発表標題 Influence of Pt and Au spacer layer on perpendicular exchange bias and coercivity in Pt/Co/spacer/Cr2O3/Pt stacked films
3. 学会等名 第64回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 白土 優
2. 発表標題 垂直交換磁気異方性の方位反転と放射光を用いた原理解明
3. 学会等名 東北大学金属材料研究所共同利用ワークショップ 3 GeV高輝度放射光SLiT-Jと産学協創(招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Thi Van Anh Nguyen, Yu Shiratsuchi, Ryoichi Nakatani
2. 発表標題 Magnetic field dependence of threshold electric field for switching exchange bias polarity
3. 学会等名 第40回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 白土 優, 加藤剛志, 鈴木義茂, 三輪真嗣, 野崎隆行, 荒河一渡
2. 発表標題 スピントロニクスデバイスを基盤としたナノ計測技術の開発と物質・材料研究への展開
3. 学会等名 SPring-8シンポジウム2016
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 白土 優
2. 発表標題 電気磁気効果によるCo/Cr203界面の垂直交換磁気異方性反転とそのダイナミクス
3. 学会等名 日本磁気学会第208回研究会（招待講演）
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 白土優	4. 発行年 2021年
2. 出版社 NTS出版	5. 総ページ数 700
3. 書名 スピントロニクスハンドブック	

〔産業財産権〕

〔その他〕

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

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
研究分担者	白土 優 (Shiratsuchi Yu) (70379121)	大阪大学・工学研究科 ・准教授 (14401)	
研究分担者	豊木 研太郎 (Toyoki Kentaro) (90780007)	大阪大学・工学研究科 ・助教 (14401)	
研究分担者	野村 光 (Nomura Hikaru) (20506258)	大阪大学・基礎工学研究科・講師 (14401)	