

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02426

研究課題名(和文) 可逆的配位数スイッチングを用いた単一マルチフェロイック材料のメモリ応用

研究課題名(英文) Memory application of single multiferroic materials using switchable coordination

研究代表者

安井 伸太郎 (Yasui, Shintaro)

東京工業大学・科学技術創成研究院・助教

研究者番号：40616687

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：IoT技術が加速的に進化し、我々はより一層便利な生活を送ることが可能となっている。その中でも記憶媒体であるメモリはキーテクノロジーであり、より小型化、高密度化が好まれる。現在利用されている多くのメモリは電圧もしくは電流にて0/1を記憶する材料が用いられているが、本研究では単一マルチフェロイック材料を用いることで0/1/2/3を記憶することが示唆され、単一体積あたり2倍の高密度化が期待できる結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでに室温以上で特性を示す単一マルチフェロイック材料はペロブスカイト型BiFeO₃以外報告がなかったが、本研究で開発されたk-Al₂O₃型構造材料群は構造がもたらす強誘電性と構成される元素によってもたらすフェリ磁性をコントロールすることで室温以上での特性を示す。これは新しい発見であり学術的に材料群の新たな探索指針を示すと共に、応用の観点から社会的にも新しいメモリ開発への展開が期待できる結果であったと言える。

研究成果の概要(英文)：With the accelerating evolution of IoT technology, we can lead an even more convenient our life. Among them, memory is a key technology and smaller size and higher density properties are demanded. Most of the memories currently used use materials that store 0/1 switched by voltage or current. In this research, 0/1/2/3 states are stored by using a single multiferroic material. It was suggested that the density should be doubled per single one currently used.

研究分野：無機材料・物性

キーワード：マルチフェロイック 強誘電性 フェリ磁性 k-Al₂O₃型構造 GaFeO₃型構造 e-Fe₂O₃型構造

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

マルチフェロイック材料は、1894年にピエールキュリー博士によって電気磁気効果が結晶学的に提唱され、その後1960年に Cr_2O_3 にて実験的に確認された。それらの効果は一般的にIntrinsicに単一物質にて動作するもの(電場で磁気もしくは磁場で電気分極をダイレクトに変化させる)において研究されてきた。しかし単一物質におけるマルチフェロイック材料は決して多くはない。2003年にWang、Rameshらによって BiFeO_3 薄膜が室温にて強誘電性および(反)強磁性を併せ持つことがScienceに報告され、この材料において幅広く研究が遂行されてきた。単一物質での研究は材料選択に限りがあることから、電場による磁気制御に絞って、圧電体/磁性体の接合を施した界面歪カップリングにより動作するヘテロ構造マルチフェロイック材料の開発も行われてきた。マルチフェロイック材料を用いたメモリは、電気分極および磁化をそれぞれ「0/1」を制御することによって、今までの倍の記憶容量が得られる事が提案されている。本材料を適用することで、本研究は今までにない単一物質で動作する新しいマルチフェロイック材料に着目して研究を行う。

強誘電性を示す材料は非常に限りがあるため、単一マルチフェロイック材料を探索する上ではまず強誘電体を選択し、それに付加的にスピンを有する遷移金属が含まれる材料で選定を行った。強誘電体材料は第二次世界大戦中に発見されたチタン酸バリウムをはじめチタン酸ジルコン酸鉛などのペロブスカイト型構造を中心に研究が行われてきた。その理由は、構造が極めて単純(酸素八面体のみの規則構造)かつ材料作製が容易だからである。さらに構造の自由度が大きく、分極値や圧電定数のチューニングが非常にしやすいのも特徴である。 BiFeO_3 もこのペロブスカイト構造を有している。しかしながら、 BiFeO_3 結晶におけるマルチフェロイック材料には決定的な欠点があり、それは電気分極を電場によって反転させることで磁化も同様に反転する事である。すなわち、電場において分極と磁化を別々に制御出来ないということになる。そうするとメモリとして応用する際に、倍の記憶密度を得ることが不可能となる。新奇な単一材料におけるマルチフェロイック材料に着目することでこのジレンマを解消し、新しいメモリ応用の展開を期待した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、今までに無い単一物質におけるマルチフェロイック $\kappa\text{-Al}_2\text{O}_3$ 材料群にて単位体積あたり倍の記憶容量を有するメモリの開発を目指すことである。本研究で用いる $\kappa\text{-Al}_2\text{O}_3$ 材料群は BiFeO_3 に次ぐ室温駆動可能なマルチフェロイック材料である。これまで期待されていたプロブスカイト構造材料群とは異なり、それぞれの強制的秩序のカップリングが全く異なるため、単一材料にもかかわらずそれぞれ制御が可能となる。隣り合うカチオン-酸素イオンの結合距離が変化することで配位数が変化し、化学結合状態を変化させ、分極反転およびスピン状態を制御することが可能となる。結晶学的視点から見た場合、外場によって配位数が変化する材料は類を見ず、この点に関して非常に学術的に面白い。一般的には、酸化物材料において外場により化学結合変化する事は活性化エネルギーが高すぎて起こりにくいと考えられる。しかしながらこの材料はそれを可能とする。この事象は従来の無機固体科学の教科書に全く無い概念であり、類を見ない新しい科学であると確信している。また元素戦略の視点から見ても、クラーク数上位の原子は酸素四面体を形成することが多く、この材料を徹底的に調査することで多様な四面体の使用方法を得る指針になりうると考えられる。

3. 研究の方法

$\kappa\text{-Al}_2\text{O}_3$ 材料群の基礎理解を進めるために、単結晶およびエピタキシャル薄膜を用いて研究を進める。強誘電性は高品質材料において大電圧を印加することがキーとなるために、特に薄膜での物性測定が重要である。また、分極反転の可能性及びメカニズムを根本から追求するために、第一原理計算を用いて結晶構造の観点より追究する。磁性は単結晶および薄膜どちらにおいても測定が可能であると考え、単結晶物性を調査することでそれらの基本的な理解につながると考える。

4. 研究成果

4 - 1 SrTiO₃基板上へのエピタキシャル薄膜の作製と評価

$\kappa\text{-Al}_2\text{O}_3$ 型酸化物を薄膜化し、強誘電性の測定を行った。非平衡プロセスであるパルスレーザー堆積法(Pulsed Laser Deposition: PLD)を用いて薄膜化することで準安定相である試料の作製が可能になる。また薄膜化することで高電場や高周波での測定ができるようになり、物質のリーク成分を低減させ強誘電性の測定が容易になる。これまでに AlFeO_3 、 InFeO_3 、 ScFeO_3 、 GaFeO_3 、Doped- GaFeO_3 、 $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ の調査を行った。いずれもPLD法を用いて SrTiO_3 (111)基板上へ薄膜を堆積させている。その結果、 $\kappa\text{-Al}_2\text{O}_3$ 型酸化物薄膜はSTO(111)基板上に001配向して成長する。また面内には薄膜の[100]方向に対してSTO基板の[11-2]、[1-21]、[-211]が平行となる3種の結晶ドメインが存在することが分かっている。薄膜の結晶ドメイン構造の図と φ スキャンおよび薄膜上面からの走査型透過電子顕微鏡によるイメージの結果をそれぞれ図1、2に示す。3種の結

晶ドメインは互いに 120 度の角度を成しており、ナノサイズオーダーの非常に小さいものであることが分かる。

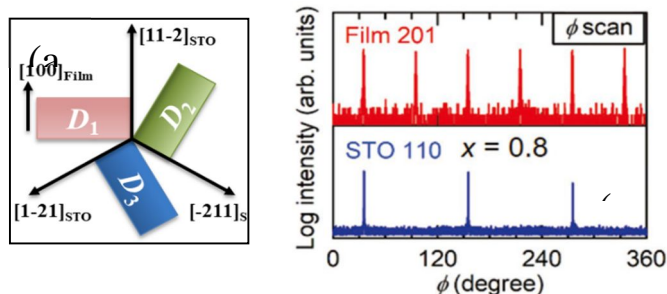


図 1 (a) κ - Al_2O_3 型酸化物薄膜の面内結晶ドメインと基板方位の関係と (b) ϕ スキャン測定

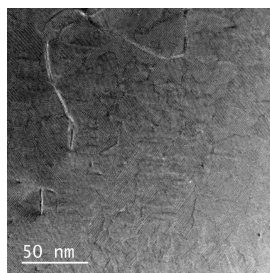


図 2 薄膜上面からの走査型透過電子顕微鏡によるイメージ

これらの作製した薄膜の強誘電性を測定するために Pt 上部電極を形成したキャパシタ構造を作製した。強誘電測定の結果は材料の構成組成に関わらず一貫して残留分極値 P_r は数 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ であった。

4 - 2 κ - Al_2O_3 材料群の分極反転メカニズム

κ - Al_2O_3 型酸化物は薄膜化によって強誘電性の測定に成功しているものの、その分極反転機構は未だ実験的に解明されていない。分極反転のモデルはこれまでに D. Stoeffler らによって予想されていたが、分極反転の活性化エネルギー E_a が約 0.5 eV/f.u. と既存の強誘電体のものと比較して非常に大きいため、新たなモデルを提案した。Stoeffler らによるモデルでは、分極反転時の中心対称構造として $Pnma$ が考えられているが、新たなモデルでは中心対称構造として $Pbcn$ を用いると、分極反転の活性化エネルギーが $E_a \sim 0.09 \text{ eV/f.u.}$ と小さくなる。室温で分極反転することを考えると分極反転機構のモデルとしてより妥当であると予想できる。興味深いことにこのモデルでは分極反転に伴って A、B 各層がそれぞれせん断運動をすることが分かっている。図 3 に分極反転機構のモデル図を示す。

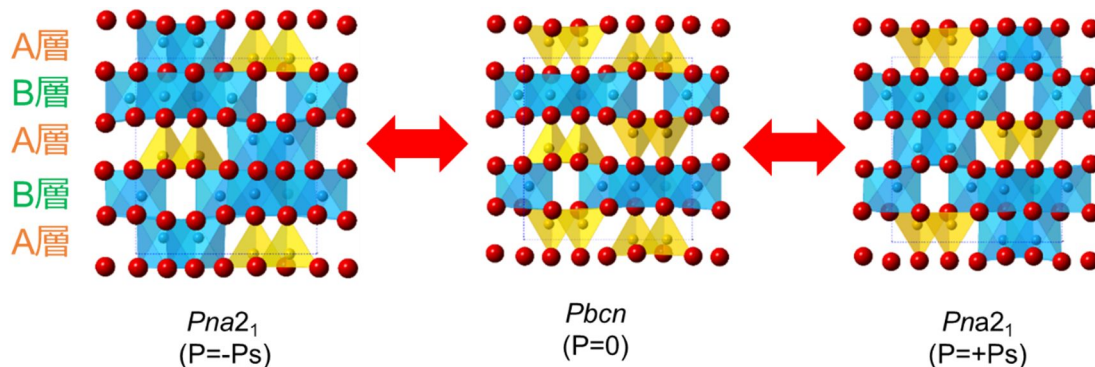


図 3 κ - Al_2O_3 型酸化物の分極反転モデル

これまでに類を見ない全く新しい分極反転機構を有すると考えられている κ - Al_2O_3 型酸化物であるがここで 1 つ問題が生じている。分極値の理論計算値は $20\text{-}25 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ と報告されているが、実際に薄膜の強誘電測定を行った結果は $P_r \sim 2 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ と約 $1/10$ になっており、大幅に小さくなっている。このことからこの新規分極反転機構モデルを実験的に証明することは困難な状況である。分極値が理論計算値よりも大幅に低い原因として、薄膜面内に存在する 3 種の結晶ドメインの存在が挙げられる。3 種のドメインは面内でそれぞれ 120° の角度をなしており、面直方向に関してはドメイン壁内においても A、B 各層は連続である。そのため分極反転時において A、B 各層のせん断運動方向が衝突することが考えられる。このことにより分極反転が阻害され、分

極値の減少に影響を及ぼしていると考えられる。

4 - 2 GaFeO₃(GFO)系単結晶の作製と評価、また基板化

FZ 法によって得られた GFO 単結晶を図 3 に示す。単結晶は直径 5 mm、長さ 15 mm の大きさで色は黒色であり、条痕色は茶色であった。

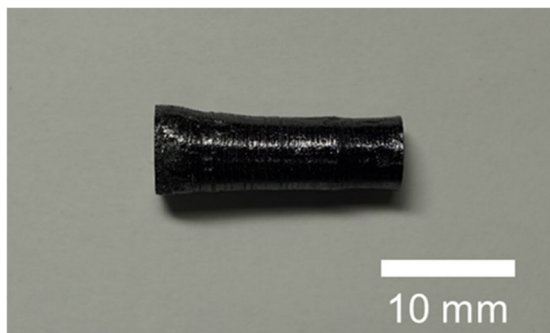


図 4 GFO 単結晶

作製した GFO 単結晶の極点測定によって同定した結晶方位より、GFO(100)、(010)、(001)単結晶基板を作製した。

作製した単結晶の磁化測定を行った。5 K、100K において GFO 単結晶の磁化に対する磁場依存性(M - H 曲線)の測定を行った結果を図 5、6 に示す。両温度についても、 a 軸に平行に磁場をかけた時と b 、 c 軸に平行に磁場をかけた時で残留磁化および保持力に明瞭な違いが見られた。この違いは GFO の a 軸方向が磁化容易軸であることに由来する。また温度が上昇したことでエネルギーが増加し、各軸において保持力の減少が見られた。また 5 K における a 軸方向の飽和磁化は $0.56 \mu_B/\text{Fe}$ 、残留磁化は $0.53 \mu_B/\text{Fe}$ であり、保磁力は 42 mT であった。これらの結果は先行研究と一致した。

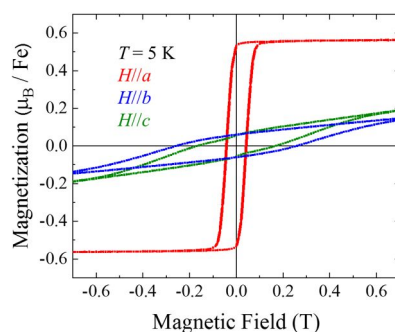


図 5 GFO 単結晶の 5 K における M - H 曲線

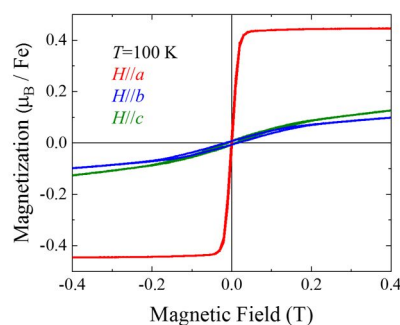


図 6 GFO 単結晶の 100 K における M - H 曲線

また、強誘電性評価を行ったが、GFO 単体ではリーク電流が大きく測定が非常に厳しいため、Sc ドープを試みた。その結果液体窒素温度にて PUND 測定で残留分極の存在は確認できたものの、理論値より一桁小さい値であった。単結晶であるために単ドメインにもかかわらずこの値で理由は、リーク電流の存在でマイナーループを観測している可能性が高い。もしくは単結晶の欠陥によるピニングにて分極反転が不完全であったとも考察できる。

4 - 3 GFO 単結晶基板上への Sc ドープ GFO エピタキシャル薄膜の作製と評価

単結晶における分極反転にはまだ不十分であったために、GFO 単結晶自身を電極かつ単ドメイン育成基板として利用する事にした。上記に示したとおり、様々な方位における単結晶基板の作製に成功したため、これらの基板上に $\text{Sc}_{0.5}\text{Fe}_{1.5}\text{O}_3$ (SFO)薄膜を PLD 法にて作製した。図 7 より

成膜後のパターンにおいて、基板ピークの低角側に見られるピークは SFO 薄膜に帰属できるピークであった。またそれ以外に薄膜の位相とみられるピークは確認できなかった。この結果から基板面直方向に SFO 薄膜が 001 配向していることが分かった。

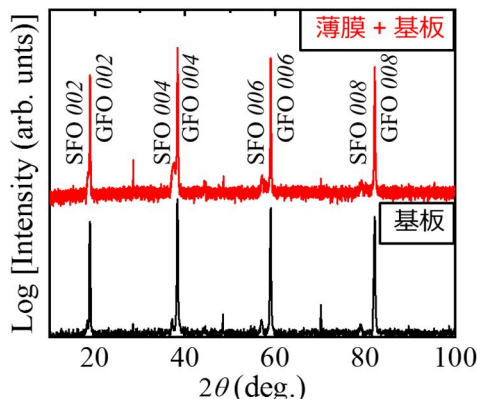


図 7 GFO 基板および SFO 薄膜の面外 X 線パターン図

作製した SFO 薄膜の強誘電性を測定するため、 $P-E$ 曲線の測定を行った。しかし明瞭なヒステリシス曲線を確認することはできなかった。その理由は下部電極のコンタクトが取れなかったためと考えられる。GFO(001)基板の成膜前と大気雰囲気下で薄膜作製条件と同じ温度と時間アニールした後の GFO(001)基板の電気抵抗率を電極と用いられる他の基板と比較した結果を表 1 に示す。これより $\text{GaFeO}_3(001)$ 基板の抵抗率が現在用いられている基板の抵抗率より 6 桁以上の開きがあることが分かった。また、アニールを行うことで抵抗率が大幅に上昇することが分かった。さらに、等価回路を仮定して薄膜と基板それぞれに印加される電圧 V_1 、 V_2 の比を計算したところ、薄膜には印加電圧 V の約 0.001% しか印加されないことが分かった。計算には、薄膜の膜厚 50 nm、基板の厚さ 0.5 mm、薄膜の抵抗率として強誘電測定が可能な強誘電体の抵抗率である $10^9 \Omega\text{cm}$ を用い、基板の抵抗率はアニール後の数値を用いた。また比誘電率は薄膜、基板ともに 30 とした。これらの結果より、薄膜を成膜した基板は基板の高い抵抗率により下部電極として使用することが不可能であり、薄膜の強誘電性が測定できなかったと考えられる。基板への種々キャリアドープを行う事で十分に電場を印加することが可能となり、単ドメインでの強誘電性評価が可能となると推定する。

表 1 GFO 基板の抵抗率と他基板との比較

ρ : SrRuO_3	ρ : Nb:SrTiO_3	$\rho // c$: GFO	$\rho // c$: GFO (アニール後)
10^{-4}	10^{-2}	5.65×10^4	1.56×10^7

4 - 5 本研究のまとめ

本研究では $\kappa\text{-Al}_2\text{O}_3$ 型強誘電体・フェリ磁性体である単一マルチフェロイック材料の実験による網羅的な研究を行った。また強誘電性の起源について第一原理計算を用いて理解した。本材料はこれまでの強誘電体の歴史にはない新しい分極反転システムを有する事が分かり、また構成される元素によって、フェリ磁性をチューニングすることができることを見いだした。発見されてから間もない材料であるため、未だ不明瞭な点は多々存在するものの、室温以上で駆動可能な単一マルチフェロイック材料としてのポテンシャルは十分に有する事が理解できる。今後も引き続き物理的な観点より基礎的な材料の解明に努める次第である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計24件（うち査読付論文 24件／うち国際共著 7件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kato S., Nakajima N., Yasui S., Yasuhara S., Fu D., Adachi J., Nitani H., Takeichi Y., Anspoks A.	4. 巻 207
2. 論文標題 Dielectric response of BaTiO ₃ electronic states under AC fields via microsecond time-resolved X-ray absorption spectroscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 116681 ~ 116681
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2021.116681	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
1. 著者名 Kasahara Jun, Katayama Tsukasa, Mo Shishin, Chikamatsu Akira, Hamasaki Yosuke, Yasui Shintaro, Itoh Mitsuru, Hasegawa Tetsuya	4. 巻 13
2. 論文標題 Room-Temperature Antiferroelectricity in Multiferroic Hexagonal Rare-Earth Ferrites	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 4230 ~ 4235
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsmi.0c20924	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 Wang Hui, Zhang Yang, Tachiyama Koki, Xia Zhaoyang, Fang Jinghong, Li Qin, Cheng Guofeng, Shi Yun, Yu Jianding, Katayama Tsukasa, Yasui Shintaro, Itoh Mitsuru	4. 巻 60
2. 論文標題 Large Polarization Switching and High-Temperature Magnetoelectric Coupling in Multiferroic GaFeO ₃ Systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Inorganic Chemistry	6. 最初と最後の頁 225 ~ 230
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.inorgchem.0c02855	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
1. 著者名 Bae In-Tae, Yasui Shintaro, Ichinose Tomohiro, Itoh Mitsuru, Shiraiishi Takahisa, Kiguchi Takanori, Naganuma Hiroshi	4. 巻 127
2. 論文標題 Growth mechanism and domain structure study on epitaxial BiFeO ₃ film grown on (La _{0.3} Sr _{0.7})(Al _{0.65} Ta _{0.35})O ₃	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 245303 ~ 245303
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0005672	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

1. 著者名 Dazai Takuro, Yasui Shintaro, Taniyama Tomoyasu, Itoh Mitsuru	4. 巻 13
2. 論文標題 Epitaxial strain engineering of luminescent properties in ZnGa ₂ O ₄ :Mn thin films	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 082004 ~ 082004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/aba286	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 Dazai Takuro, Yasui Shintaro, Taniyama Tomoyasu, Itoh Mitsuru	4. 巻 46
2. 論文標題 Bandgap tuning and optimization of green-emitting Zn ₂ SnO ₄ -Mg ₂ SnO ₄ :Mn ²⁺ using combinatorial pulsed laser deposition	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Ceramics International	6. 最初と最後の頁 21771 ~ 21774
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ceramint.2020.05.288	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 Gu Ke, Katayama Tsukasa, Yasui Shintaro, Chikamatsu Akira, Yasuhara Sou, Itoh Mitsuru, Hasegawa Tetsuya	4. 巻 30
2. 論文標題 Simple Method to Obtain Large Size Single Crystalline Oxide Sheets	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Functional Materials	6. 最初と最後の頁 2001236 ~ 2001236
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adfm.202001236	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 Rao Badari Narayana, Yasui Shintaro, Han Yefei, Hamasaki Yosuke, Katayama Tsukasa, Shiraishi Takahisa, Kiguchi Takanori, Itoh Mitsuru	4. 巻 2
2. 論文標題 Redox-Based Multilevel Resistive Switching in AlFeO ₃ Thin-Film Heterostructures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Electronic Materials	6. 最初と最後の頁 1065 ~ 1073
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaem.0c00083	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 Yasuhara Sou, Hamasaki Yosuke, Katayama Tsukasa, Ao Takahiro, Inaguma Yoshiyuki, Hojo Hajime, Karppinen Maarit, Philip Anish, Yasui Shintaro, Itoh Mitsuru	4. 巻 59
2. 論文標題 Modulating the Structure and Magnetic Properties of $\text{-Fe}_2\text{O}_3$ Nanoparticles via Electrochemical Li^+ Insertion	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Inorganic Chemistry	6. 最初と最後の頁 4357 ~ 4365
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.inorgchem.9b03302	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 Hamasaki Yosuke, Katayama Tsukasa, Yasui Shintaro, Shiraiishi Takahisa, Akama Akihiro, Kiguchi Takanori, Taniyama Tomoyasu, Itoh Mitsuru	4. 巻 8
2. 論文標題 Switchable third ScFeO_3 polar ferromagnet with YmO_3 -type structure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry C	6. 最初と最後の頁 4447 ~ 4452
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9TC07006K	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 Rao Badari Narayana, Yasui Shintaro, Katayama Tsukasa, Taguchi Ayako, Moriwake Hiroki, Hamasaki Yosuke, Itoh Mitsuru	4. 巻 8
2. 論文標題 Investigation of ferrimagnetism and ferroelectricity in $\text{Al}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_3$ thin films	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry C	6. 最初と最後の頁 706 ~ 714
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9TC05390E	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 Kato S., Nakajima N., Yasui S., Yasuhara S., Fu D., Adachi J., Nitani H., Takeichi Y., Anspoks A.	4. 巻 207
2. 論文標題 Dielectric response of BaTiO_3 electronic states under AC fields via microsecond time-resolved X-ray absorption spectroscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 116681 ~ 116681
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2021.116681	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

1. 著者名 Kasahara Jun, Katayama Tsukasa, Mo Shishin, Chikamatsu Akira, Hamasaki Yosuke, Yasui Shintaro, Itoh Mitsuru, Hasegawa Tetsuya	4. 巻 13
2. 論文標題 Room-Temperature Antiferroelectricity in Multiferroic Hexagonal Rare-Earth Ferrites	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 4230 ~ 4235
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.0c20924	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 Wang Hui, Zhang Yang, Tachiyama Koki, Xia Zhaoyang, Fang Jinghong, Li Qin, Cheng Guofeng, Shi Yun, Yu Jianding, Katayama Tsukasa, Yasui Shintaro, Itoh Mitsuru	4. 巻 60
2. 論文標題 Large Polarization Switching and High-Temperature Magnetoelectric Coupling in Multiferroic GaFeO ₃ Systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Inorganic Chemistry	6. 最初と最後の頁 225 ~ 230
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.inorgchem.0c02855	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

1. 著者名 Bae In-Tae, Yasui Shintaro, Ichinose Tomohiro, Itoh Mitsuru, Shiraiishi Takahisa, Kiguchi Takanori, Naganuma Hiroshi	4. 巻 127
2. 論文標題 Growth mechanism and domain structure study on epitaxial BiFeO ₃ film grown on (La _{0.3} Sr _{0.7})(Al _{0.65} Ta _{0.35})O ₃	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 245303 ~ 245303
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0005672	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

1. 著者名 Dazai Takuro, Yasui Shintaro, Taniyama Tomoyasu, Itoh Mitsuru	4. 巻 13
2. 論文標題 Epitaxial strain engineering of luminescent properties in ZnGa ₂ O ₄ :Mn thin films	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 082004 ~ 082004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/aba286	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 Dazai Takuro, Yasui Shintaro, Taniyama Tomoyasu, Itoh Mitsuru	4. 巻 46
2. 論文標題 Bandgap tuning and optimization of green-emitting Zn ₂ SnO ₄ -Mg ₂ SnO ₄ :Mn ²⁺ using combinatorial pulsed laser deposition	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Ceramics International	6. 最初と最後の頁 21771 ~ 21774
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ceramint.2020.05.288	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 Dazai Takuro, Yasui Shintaro, Taniyama Tomoyasu, Itoh Mitsuru	4. 巻 59
2. 論文標題 Cation-Deficiency-Induced Crystal-Site Engineering for ZnGa ₂ O ₄ :Mn ²⁺ Thin Film	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Inorganic Chemistry	6. 最初と最後の頁 8744 ~ 8748
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.inorgchem.0c00359	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 Gu Ke, Katayama Tsukasa, Yasui Shintaro, Chikamatsu Akira, Yasuhara Sou, Itoh Mitsuru, Hasegawa Tetsuya	4. 巻 30
2. 論文標題 Simple Method to Obtain Large Size Single Crystalline Oxide Sheets	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Functional Materials	6. 最初と最後の頁 2001236 ~ 2001236
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adfm.202001236	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 Rao Badari Narayana, Yasui Shintaro, Han Yefei, Hamasaki Yosuke, Katayama Tsukasa, Shiraishi Takahisa, Kiguchi Takanori, Itoh Mitsuru	4. 巻 2
2. 論文標題 Redox-Based Multilevel Resistive Switching in AlFeO ₃ Thin-Film Heterostructures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Electronic Materials	6. 最初と最後の頁 1065 ~ 1073
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaem.0c00083	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 Yasuhara Sou, Hamasaki Yosuke, Katayama Tsukasa, Ao Takahiro, Inaguma Yoshiyuki, Hojo Hajime, Karppinen Maarit, Philip Anish, Yasui Shintaro, Itoh Mitsuru	4. 巻 59
2. 論文標題 Modulating the Structure and Magnetic Properties of $-Fe_2O_3$ Nanoparticles via Electrochemical Li^+ Insertion	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Inorganic Chemistry	6. 最初と最後の頁 4357 ~ 4365
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.inorgchem.9b03302	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 Subash Sruthy, Yasui Shintaro, Yasuhara Sou, Patro L.N., Bharathi K. Kamala	4. 巻 354
2. 論文標題 Evaluation of band edge parameters, Li ion dynamics and excellent electrochemical properties of $Li_4Ti_5O_{12}$ anode thin films	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Electrochimica Acta	6. 最初と最後の頁 136741 ~ 136741
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.electacta.2020.136741	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

1. 著者名 Hamasaki Yosuke, Katayama Tsukasa, Yasui Shintaro, Shiraiishi Takahisa, Akama Akihiro, Kiguchi Takanori, Taniyama Tomoyasu, Itoh Mitsuru	4. 巻 8
2. 論文標題 Switchable third $ScFeO_3$ polar ferromagnet with YmO_3 -type structure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry C	6. 最初と最後の頁 4447 ~ 4452
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9TC07006K	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 Rao Badari Narayana, Yasui Shintaro, Katayama Tsukasa, Taguchi Ayako, Moriwake Hiroki, Hamasaki Yosuke, Itoh Mitsuru	4. 巻 8
2. 論文標題 Investigation of ferrimagnetism and ferroelectricity in $Al_xFe_{2-x}O_3$ thin films	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry C	6. 最初と最後の頁 706 ~ 714
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9TC05390E	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0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

安井研究室website
<https://shintaroyasui.com/>

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	伊藤 満 (Itoh Mitsuru) (30151541)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・招聘研究員 (82626)	
研究協力者	濱寄 容丞 (Hamasaki Yosuke) (40826624)	防衛大学校・応用科学群・助教 (82723)	
研究協力者	片山 司 (Katayama Tsukasa) (50784617)	北海道大学・電子科学研究所・准教授 (10101)	
研究協力者	森分 博紀 (Moriwake Hiroki) (40450853)	一般財団法人ファインセラミックスセンター・その他部局等・主席研究員 (83906)	

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
---------	---------