

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K15161

研究課題名（和文）人工反強磁性体を利用した反強磁性スピン波の制御

研究課題名（英文）Control of antiferromagnetic spin waves in synthetic antiferromagnets

研究代表者

塩田 陽一（Shiota, Yoichi）

京都大学・化学研究所・助教

研究者番号：70738070

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、層間交換結合を有する人工反強磁性体中を伝搬する反強磁性スピン波の制御を目指して研究に取り組んだ。主要な成果として、面内磁化の人工反強磁性体中において反強磁性共鳴モードの強い相互作用（共鳴周波数の反交差）が観測され、この現象がスピン波の動的な双極子相互作用に起因することを明らかにした。垂直磁化の人工反強磁性体においては、二つの共鳴モードの観測に成功し、それぞれが右回り・左回りの反強磁性共鳴モードであることを明らかにした。また

研究成果の学術的意義や社会的意義  
スピン波（マグノン）を情報の処理、記憶、伝送などに用いる様々な技術が提案されており、このような応用を目指した研究分野は「マグノニクス」として近年注目を集めている。本研究によって明らかになった反強磁性共鳴モードの強い相互作用は、量子情報処理を目指して研究が進められているハイブリッド量子系に新しい視点を与え、スピン波を利用した新たな情報処理技術の開拓につながることを期待される。また回転方向の異なる共鳴モードを有する垂直磁化の人工反強磁性体はスピン波偏光という新たな自由度追加の可能性を示した。

研究成果の概要（英文）：In this study, we have investigated the antiferromagnetic spin waves propagating in synthetic antiferromagnets (SAFs) with interlayer exchange coupling. As a major result, we observed the interaction of antiferromagnetic resonance modes (anti-crossing of resonance frequencies) in in-plane magnetized SAFs, and clarified that this phenomenon is caused by the dynamic dipolar interaction of spin waves. In perpendicularly magnetized SAFs, two resonance modes were successfully observed, and it was clarified that each of them is right-handed or left-handed antiferromagnetic resonance mode.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スピントロニクス スピン波 マグノン 人工反強磁性体

## 1. 研究開始当初の背景

磁性体中の磁気モーメントの波である「スピン波 (マグノン)」は、nm- $\mu$ m オーダーの波長を有していることや伝搬に電荷の移動を伴わないことから、小型で低消費電力な情報伝達として期待されている。このスピン波を対象とした研究分野は「マグノニクス」と呼ばれ近年注目を集めている。この中で、重要な役割を担ってきたのは強磁性体であるが、スピン波デバイスの微細化および高速動作などのさらなる発展には、反強磁性スピンドイナミクスの利用が不可欠である。反強磁性体は、漏れ磁場が無く、また強い反強磁性結合に起因する高い共鳴周波数 (数 THz) を有する一方で、従来の電氣的測定が困難である。加えて、反強磁性体のスピンは磁場などの外場に対する応答がほとんどなくスピン制御の方法に大きな課題が残っているため、十分な研究がなされていなかった。

強磁性/非磁性/強磁性の構造において、非磁性層を介して2つの強磁性層の磁化が反強磁性的に結合 (層間交換結合) したものを人工反強磁性体と呼ぶ。層間交換結合は一般的な反強磁性体の交換結合に比べて弱いので、磁化配置を外部磁場によって容易に制御でき、さらに電気測定可能な共鳴モード (数十 GHz) を有するため、反強磁性スピンドイナミクスを調べるのに適した材料である。

## 2. 研究の目的

反強磁性スピン波は、強磁性スピン波とは異なり興味深い現象が予想されることから、主に理論の研究が多く報告されているが、励起・検出の難しさから実験的に観測した例は少ない。そこで本研究では、層間交換結合を有する人工反強磁性体のスピンドイナミクスに着目し、反強磁性スピン波特有の物理現象の探索に取り組み、反強磁性スピン波を利用したマグノニクス応用への展開を目指した。

## 3. 研究の方法

(1) 面内磁化の反強磁性結合を有する人工反強磁性体の素子構造において、励起されるスピン波共鳴モードの分散関係を調べた。試料は熱酸化膜付きシリコン基板上にマグネトロンスパッタリング法により製膜し、膜構造は Ta(3 nm)/Ru(3 nm)/FeCoB(15 nm)/Ru(0.6 nm)/FeCoB(15 nm)/Ru(3 nm) である。上下 FeCoB 層の磁化は Ru(0.6 nm) との界面で層間交換結合を介して反平行に結合している。この素子を電子線描画装置・Ar イオンミリング装置を用いて  $50 \times 100 \mu\text{m}^2$  の細線形状に加工し、スピン波励起・検出用のアンテナをリフトオフ法を用いて作製した。スピン波共鳴の観測にはベクトルネットワークアナライザを用いて測定を行った。

(2) 面直磁化の反強磁性結合を有する人工反強磁性体の素子構造において、励起されるスピン波共鳴モードの分散関係を調べた。素子作製・測定方法は (1) と同様であるが、膜構造は Ta(3 nm)/Pt(2 nm)/[Co(0.2 nm)/Ni(0.7 nm)]<sub>5.5</sub>/Ru(0.5 nm)/[Co(0.2 nm)/Ni(0.7 nm)]<sub>5.5</sub>/Ru(3 nm) である。Co/Ni 多層膜は大きな垂直磁気異方性を有するため、垂直磁化容易軸を有する。

(3) スピン波の伝搬過程をより詳細に調べるためには、空間分解能を有する測定手法の開発が不可欠である。そこで、磁気光学 Kerr 効果と光ヘテロダイン検波法を利用した新しい測定系の開発を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 面内磁化の人工反強磁性体におけるマグノン-マグノン強結合の観測

図 1(a) に本研究で用いた面内磁化の人工反強磁性体における面内磁場下での磁化曲線を示す。 $\pm 100 \text{ mT}$  以上の磁場では上下の磁化配置は平行状態になっているのに対して、それより小さい磁場領域ではキャント状態となっていることを確認した。これは磁気異方性のない人工反強磁性体で得られる典型的な磁化曲線であり、本研究で用いた試料が Ru を介して反強磁性的な結合を有していることが確認できた。

次に、スピン波の伝搬方向に対して様々な磁場角度  $\varphi_k$  において測定したスピン波共鳴スペクトルの磁場依存性を図 1(b) に示す。測定に用いたデバイスおよび磁場印加方向は挿入図に示すとおりである。外部磁場が  $100 \text{ mT}$  以下の領域においては、上下の磁化が同位相で振動する“音響モード”と逆位相で振動する“光学モード”に対応する共鳴ピークが観測された。ここで、共鳴ピークにおけるスピン波の波数ベクトルは、励起アンテナのデザインにより決定される。 $\varphi_k = 0^\circ, 90^\circ$  の時、音響モード・光学モードの共鳴ピークは磁場に対して単調に変化している。一方、 $\varphi_k = 45^\circ$  の時、二つの共鳴周波数が一致する磁場の条件で反交差が観測された。これはそれぞれのモードが相互作用していることを意味している。相互作用の強さは反交差の大きさ  $g$  で特徴付けられ、音響モード・光学モードの共鳴線幅に対応する散逸レート  $\kappa_a, \kappa_o$  よりも大きいことから、強結合状態 ( $g > \kappa_a, \kappa_o$ ) が実現されていることが分かった。また、今回観測された反交差の大きさ  $g$  は、磁場印可角度や励起したスピン波の波数  $k$  によって変調可能であることが特徴である。これらの実験結果から、 $k \neq 0$  においてのみ働くスピン波の動的磁気双極子相互作用の存在が重要であると考え、理論モデルを構築し考察を行った。その結果、 $\varphi_k = 45^\circ$  の時、音響・光学モー

ドの共鳴周波数が一致する磁場強度において、上下の磁化配置はスピン波伝搬方向に対して平行または直交の関係となっており、スピン波による動的磁気双極子相互作用を考慮すると、上下の磁化の交換に対して相性の破れが起きていることから、反交差が見られることが分かった。今回観測された磁気振動モード同士の相互作用はマグノン-マグノン結合と呼ばれ、マグノンを利用した量子情報処理技術への応用が期待される。

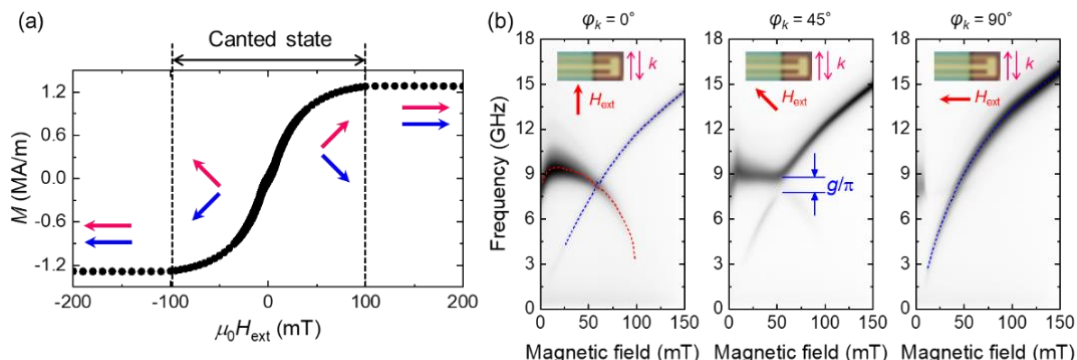


図1 面内磁化の人工反強磁性体における(a)面内磁場下での磁化曲線と(b) $\varphi_k = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ におけるスピン波共鳴スペクトル。(b)において破線は共鳴ピークを表し、青色が音響モード、赤色が光学モードに対応する。挿入図はデバイスの光学顕微鏡図で、スピン波の伝搬方向と外部磁場の関係を表す。

### (2) 面直磁化の人工反強磁性体におけるスピン波共鳴モードの観測

図2(a)に本研究で用いた面直磁化の人工反強磁性体における面直磁場下での磁化曲線を示す。 $\pm 200$  mT以上の磁場では上下の磁化配置は平行状態になっているのに対して、それより小さい磁場領域では全体の磁化がゼロになっていることから反平行状態となっていることを確認した。

次に、面直磁場下でのスピン波共鳴スペクトルを図2(b)に示す。平行磁化状態においては単一の共鳴ピークしか得られていないのに対して、反平行磁化状態においては二つの共鳴ピークの観測に成功した。またそれぞれの共鳴ピークは-100 mTの磁場強度において縮退しており、さらに異なる磁場依存性を示す振る舞いが観測された。これらの共鳴ピークは反強磁性体で観測される右回り・左回りの磁気共鳴モードに対応することが理論的な考察からわかった。また、上下の強磁性層の垂直磁気異方性が異なるために、二つの共鳴ピークが交差する磁場がゼロ磁場からずれることがわかった。一般的な反強磁性体では、強力な交換結合エネルギーのために共鳴周波数はTHz領域に達するが、人工反強磁性体はGHz領域に共鳴周波数を持ち磁場で容易に制御可能であることから、今後はスピン波デバイスに偏光という新たな自由度を追加できる可能性を示す結果が得られた。

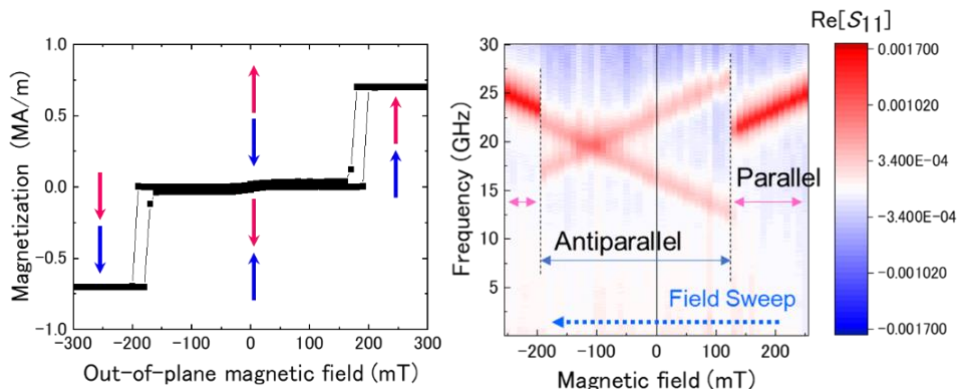


図2 面直磁化の人工反強磁性体における(a)面直磁場下での磁化曲線と(b)スピン波共鳴スペクトル。

### (3) 磁化ダイナミクスの空間分布測定

スピン波の新しい検出方法として磁気光学 Kerr 効果と光ヘテロダイン検波法を利用した新しい測定系の立ち上げを行った。この測定法はスピン波の強度と位相を高い空間分解能 (サブ  $\mu\text{m}$  程度) で測定することが可能である。まずは強磁性体 Py の磁性細線において細線幅を変化させた時に観測されるスピン波ビーム、および強磁性細線幅方向に量子化されたスピン波モードの干渉の測定に成功した。また測定されたスピン波の強度と位相の空間分布をフーリエ変換することで、スピン波の分散関係を得ることに成功した。またこの測定手法を用いて、スピントルク磁気共鳴法で一般に用いられる構造において磁性細線中の磁化ダイナミクスの空間分布の測定にも成功した。従来の電気的な測定手法では磁性細線の平均の除法しか得られなかったが、光による局所的な測定により、磁気異方性・ダンピング定数の非均一性を直接測定することが可能になった。今後はこの手法を用いて、人工反強磁性体における伝搬スピン波のより詳細な計測を行っていった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shiota Yoichi, Funada Shinsaku, Hisatomi Ryusuke, Moriyama Takahiro, Ono Teruo	4. 巻 116
2. 論文標題 Imaging of caustic-like spin wave beams using optical heterodyne detection	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 192411 ~ 192411
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0010410	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 Funada Shinsaku, Shiota Yoichi, Ishibashi Mio, Moriyama Takahiro, Ono Teruo	4. 巻 13
2. 論文標題 Enhancement of spin wave group velocity in ferrimagnets with angular momentum compensation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 063003 ~ 063003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ab916d	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 Shiota Yoichi, Taniguchi Tomohiro, Ishibashi Mio, Moriyama Takahiro, Ono Teruo	4. 巻 125
2. 論文標題 Tunable Magnon-Magnon Coupling Mediated by Dynamic Dipolar Interaction in Synthetic Antiferromagnets	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 017203 ~ 017203
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.125.017203	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 Shiota Yoichi, Hisatomi Ryusuke, Moriyama Takahiro, Ono Teruo	4. 巻 102
2. 論文標題 Observation of the dispersion relations for quantized coherent spin waves excited by a microwave antenna	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 214440 ~ 214440
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.214440	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 Hung Y. M., Li T., Hisatomi R., Shiota Y., Moriyama T., Ono T.	4. 巻 45
2. 論文標題 Low Current Driven Vertical Domain Wall Motion Memory with an Artificial Ferromagnet	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Magnetics Society of Japan	6. 最初と最後の頁 6~11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3379/msjmag.2011R002	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 Hung Yu Min, Shiota Yoichi, Hisatomi Ryusuke, Moriyama Takahiro, Ono Teruo	4. 巻 14
2. 論文標題 High thermal stability and low driven current achieved by vertical domain wall motion memory with artificial ferromagnet	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 023001~023001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/abd86a	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 Hirata Yuushou, Noda Kaoru, Shiota Yoichi, Moriyama Takahiro, Ono Teruo	4. 巻 60
2. 論文標題 Field-driven domain wall creep motion in ferrimagnetic Tb/CoFeB/MgO microwires	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 020902~020902
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abd67d	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 Ishibashi M., Shiota Y., Funada S., Moriyama T., Ono T.	4. 巻 45
2. 論文標題 Spin Wave Resonance in Perpendicularly Magnetized Synthetic Antiferromagnets	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Magnetics Society of Japan	6. 最初と最後の頁 25~29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3379/msjmag.2103R004	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 Kobayashi Y., Ikebuchi T., Shiota Y., Ono T., Moriyama T.	4. 巻 45
2. 論文標題 Estimation of Magnetic Domain Size in Chiral Antiferromagnet Mn3Ir by the Anomalous Hall Measurements	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Magnetism Society of Japan	6. 最初と最後の頁 75 ~ 78
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3379/msjmag.2107L002	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 Hung Yu Min, Shiota Yoichi, Yamada Shogo, Ohta Minoru, Shibata Tatsuo, Sasaki Tomoyuki, Hisatomi Ryusuke, Moriyama Takahiro, Ono Teruo	4. 巻 119
2. 論文標題 Positive correlation between interlayer exchange coupling and the driving current of domain wall motion in a synthetic antiferromagnet	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 032407 ~ 032407
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0056056	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 Shiota Yoichi, Hisatomi Ryusuke, Moriyama Takahiro, Samardak Alexander S., Ono Teruo	4. 巻 119
2. 論文標題 Inhomogeneous magnetic properties characterized by simultaneous electrical and optical detection of spin-torque ferromagnetic resonance	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 192409 ~ 192409
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0070012	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 Ikebuchi Tetsuya, Kobayashi Yuta, Sugiura Itaru, Shiota Yoichi, Ono Teruo, Moriyama Takahiro	4. 巻 14
2. 論文標題 Long-distance spin current transmission in single-crystalline NiO thin films	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 123001 ~ 123001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ac3575	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 Arakawa Tomonori, Shiota Yoichi, Yamada Keisuke, Ono Teruo, Kon Seitaro	4. 巻 93
2. 論文標題 Magnetic polarization selective spectroscopy of magnetic thin films probed by wideband crossed microstrip circuit in GHz regime	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 013901 ~ 013901
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0074654	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 Ikebuchi Tetsuya, Shiota Yoichi, Ono Teruo, Nakamura Kohji, Moriyama Takahiro	4. 巻 120
2. 論文標題 Crystal orientation dependence of spin Hall angle in epitaxial Pt/FeNi systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 072406 ~ 072406
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0078688	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 Shiota Yoichi, Noda Kaoru, Hirata Yuushou, Kuwano Kyosuke, Funada Shinsaku, Hisatomi Ryusuke, Moriyama Takahiro, Stebliy Maksim, Ognev Alexey V., Samardak Alexander S., Ono Teruo	4. 巻 553
2. 論文標題 Temperature dependence of domain wall creep motion in ferrimagnetic Tb/CoFeB/MgO microwires	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Magnetism and Magnetic Materials	6. 最初と最後の頁 169251 ~ 169251
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmmm.2022.169251	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11件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Yoichi Shiota
2. 発表標題 Strong magnon-magnon coupling in synthetic antiferromagnets
3. 学会等名 第44回日本磁気学会季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 船田晋作
2. 発表標題 角運動量補償点を持つフェリ磁性体におけるスピン波の考察
3. 学会等名 Spin-RNJ 若手オンライン研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shinsaku Funada
2. 発表標題 Enhancement of Spin Wave Group Velocity in Ferrimagnets at Angular Momentum Compensation Temperature
3. 学会等名 2020 International Conference on Solid State Devices and Materials (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yu Min Hung
2. 発表標題 Low Current driven Vertical DW Motion Memory with Artificial Ferromagnet
3. 学会等名 第44回日本磁気学会季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Mio Ishibashi
2. 発表標題 Spin Wave Resonance in Perpendicular Magnetized Synthetic Antiferromagnets
3. 学会等名 第44回日本磁気学会季学術講演会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 Funada Shinsaku
2. 発表標題 フェリ磁性ガーネットGd <sub>3</sub> Fe <sub>5</sub> O <sub>12</sub> 薄膜におけるスピン波測定
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoichi Shiota
2. 発表標題 Propagating spin wave dynamics in synthetic antiferromagnets
3. 学会等名 2022 Korean Physical Society Spring Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoichi Shiota
2. 発表標題 Simultaneous electrical and optical detections of spin-torque ferromagnetic resonance
3. 学会等名 2021年 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoichi Shiota
2. 発表標題 Simultaneous electrical and optical detections of spin-torque ferromagnetic resonance
3. 学会等名 2022 Joint MMM-Intermag (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 船田晋作
2. 発表標題 フェリ磁性ガーネットGd <sub>3</sub> Fe <sub>5</sub> O <sub>12</sub> 薄膜における磁気共鳴
3. 学会等名 粉体粉末冶金協会 2021年度春季大会（127回講演大会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 船田晋作
2. 発表標題 PLD法作製フェリ磁性ガーネットGd <sub>3</sub> Fe <sub>5</sub> O <sub>12</sub> 薄膜における磁気共鳴の温度依存性
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>京都大学教育研究活動データベース  <a href="https://kyouindb.iimc.kyoto-u.ac.jp/j/uH1mU">https://kyouindb.iimc.kyoto-u.ac.jp/j/uH1mU</a></p>
--

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

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