

令和 5 年 6 月 29 日現在

機関番号：33924

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02185

研究課題名(和文)超省電力化と超高速化を両立する希土類・遷移金属フェリ磁性細線メモリの創成

研究課題名(英文)Creation of new magnetic wire memory with rare-earth and transition-metal ferri-magnetic magnetic wire that achieves both ultra-low power consumption and ultra-high speed

研究代表者

栗野 博之(AWANO, HIROYUKI)

豊田工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40571675

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)：重希土類・遷移金属合金からなるフェリ磁性細線メモリでは、細線に電流を印加することで細線上に記録したデータ列を任意の場所に動かすことができる。これを低消費電力メモリとして使えるようにするためにはデータ列を少ない電力で高速に駆動する必要がある。そこで、GdFeCo/Ptヘテロ界面磁性細線を作成し、この細線上を記録磁区を低電流でかつ高速に駆動できる方法を検討した。その結果、印加電流のパルス幅を3nsecと狭くすることで少ない電流で磁区列を2000m/secと高速に駆動できることを見出した。また、少なくとも0から70℃まで磁壁移動速度を1200m/sec以上の高速で駆動できることも示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁性細線に電流を印加することで細線上に記録したデータ列を任意の場所に動かすことができる。このように磁性細線メモリでは、従来の磁気ディスクとは違って機械部分を持たない全固体磁気メモリとなる。したがって、モータの電力が不要となるため消費電力を1000分の1に低減することが期待できる。しかし、データ列の駆動電力低減とそのスピード高速化の両立が課題であった。そこで、重希土類・遷移金属合金からなるフェリ磁性細線メモリとすることで、高速磁壁駆動が可能な条件で磁壁駆動電力も低減できる両立条件を様々な条件で探索した。その結果、両立条件は磁壁駆動に必要なパルス電流のパルス幅を短くすることであることを見出した。

研究成果の概要(英文)：In a ferrimagnetic nanowire memory made of a heavy rare earth/transition metal alloy, a data string recorded on the nanowire can be driven to an arbitrary location by applying a current to the nanowire. In order to use the real application as a low power consumption memory, it is necessary to drive the data string at high speed with little power. Therefore, we prepared a GdFeCo/Pt heterointerface magnetic nanowire and investigated a clever method to drive the recording magnetic domain on this nanowire at low current and high speed. As a result, we found that by narrowing the pulse width of the applied current to 3 nsec, the recorded magnetic domain pattern can be driven at a high speed of 2000m/sec with a small current. It was also shown that the domain wall motion velocity can be driven at a high speed of 1200m/sec or more from 0 °C to 70 °C.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：磁性細線メモリ 超高速光磁気記録 高速データレート 高速磁壁移動速度 希土類・遷移金属合金
短パルス電流高速磁壁駆動 GdFeCo 超低消費電力

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

IoT であらゆるデータを採取し、それをビッグデータとしてデータセンターに蓄積する。その膨大なデータを AI で解析して生産性を高める。このような Society 5.0 による大きな経済成長が期待されている。ただし、ビッグデータは指数関数的に増大するためデータセンターの消費電力が大きな問題となっている。この消費電力問題の根源は、データ処理の要として利用されている揮発メモリで消費電力の大きな SRAM にある。SRAM ではデータを電荷で蓄えているため、データ保持に大量の電力を消費する。この問題解決のため、データ保持に電力不要の磁気ランダムアクセスメモリ(MRAM)の出現が期待されている。ただし、MRAM はメモリ部分が複雑なため、ビットコストが高いという問題がある。通常 MRAM には 1 ビットしか記録できないが、複数ビットを記録できるレーストラックメモリが IBM より提案された。複数ビット分ビットコストを低減できる。ただし、ビット線とワード線のクロスポイントまで複数ビットを動かして記録再生する必要がある。この複数ビットの移動には電流によるスピントランスファートルク(STT)あるいはスピン軌道トルク(SOT)を利用する。この複数ビット移動には比較的大きな電流密度が必要であり、その電流密度の低減により消費電力を抑えること、高速磁壁移動によるデータ転送速度向上が求められる。我々はこれまでの様々な検討結果からこれら課題解決には希土類・遷移金属合金フェリ磁性細線が有用であることを示してきた。

2. 研究の目的

そこで、本研究では磁性細線メモリの電流密度低減と高速磁壁移動の両立できる条件を見出すことを目的とする。

3. 研究の方法

磁性細線の作製には、一般的なリフトオフ法とナノインプリント法を用いた。磁性細線の作製には超高真空マグネトロンスパッタ装置を用い、基板上に下地膜、磁性膜、カバー層を成膜した。磁性膜としては、希土類金属として Gd または Tb を、遷移金属としては Fe または Co を用いた。前述 SOT の大きさはジャロシンスキー守谷相互作用(DMI)とスピンホール効果(SHE)で決まる。そこで、DMI や SHE の大きな重金属下地層として Pt、W、Ta、Ru を、比較材料として DMI や SHE の小さな Cu を採用した。作成した磁性細線はネオアーク製偏光顕微鏡試料ステージにセットして、ピコセカンド社のパルス電流印加装置で 100nsec 以下のパルス電流を印加して、磁性細線上の磁壁の動きを詳細に調べた。また、この偏光顕微鏡には青色レーザーが搭載されており、対物レンズで集光された光を用いることで磁性細線を局所的にアニールすることができる。プラスチック基板上への磁性細線作成法にはナノインプリント装置を用いた。また、磁性細線にパルス電流を印加した時の発熱分布は熱シミュレーションで求めた。

4. 研究成果

図 1(a)には、磁壁移動速度の他機関とのベンチマークを示す。本提案では GdFeCo 磁性細線を使っており、磁壁移動速度は競合機関に比べて最速であることがわかる。この最速を得るためには、図 1(b)に示すように印加する電流のパルス幅を狭くすることが重要である。この速い磁壁駆動の安定性を調べるために、パルス幅 3nsec と 30nsec としたときのパルス印加回数と磁壁移動距離の関係を図 1(c)に示すが、パルス幅によらず磁壁移動距離はパルス印加回数に正比例する。このように磁壁移動速度によらず、安定した磁壁移動が可能であることが確認できた。さて、高速磁壁駆動は確認できたが、印加電流密度が小さいことが望まれる。そこで、磁壁移動速度をその駆動に利用した電流密度で規格化した値(磁壁移動度)を縦軸に示した。他機関の報告例から抽出した磁壁移動度も比較のために図 1(d)に示した。この図からわかるように、IBM や MIT の結果に比べて本提案の GdFeCo 磁性細線の磁壁移動度は圧倒的に大きい。特に、パルス幅 3nsec のときが大きい。この結果から磁壁駆動の電力を低く、高速に駆動する両立条件としては、印加パルス幅を短くすることがキー技術であることを見出した。

次に、この磁性細線メモリにおける磁壁の高速な動きの温度依存性を調べた。印加電流密度を一定にして磁性細線のステージ温度を 0 (273K)から 70 (343K)まで変化させたときの磁壁移動速度を図 2(a)に示す。Gd と FeCo はフェリ磁性で互いに逆向きに結合しているので、ある組成で磁化をキャンセルすることができる。これを磁化補償組成と呼ぶ。同様に角運動量をキャンセルすることもできる。これを角運動量補償温度(T_{AMC})と呼ぶ。図 2(a)で磁壁移動速度の最速温度はパルス幅によらずこの T_{AMC} 付近であることが分かる。しかし、この T_{AMC} からはずれた温度であっても実用温度域の 0 (273K)から 70 (343K)までの間の速

度変動はそれほど大きくない。特に、パルス幅 3nsec のときには、この広い温度範囲で 1200m/sec 以上での高速駆動が可能であることがわかる。このパルス幅 3nsec と 30nsec の磁壁移動速度の違いの原因を調べるために熱計算を行った。結果を図 2(b)に示す。印加電流密度は同じなのでパルス幅が長いほどジュール発熱は増える。3nsec の場合には、パルス幅が短いと細線中央の最高温度でも 6K 程度の温度上昇である。また、細線エッジと細線中央の温度差は 2K 程度と小さいので細線上を磁壁が均一に動くことができると考えられる。一方、30nsec の場合には細線中央と細線エッジの温度差が 5K くらいであり、細線エッジと細線中央での磁壁移動条件にわずかに差が出ており、それが磁壁移動速度の低下を招いている可能性が考えられる。

パルス幅を短くする方法以外に電流密度低減と磁壁高速移動を両立できる方法として、細線へのレーザーアニール法を見出した。結果を図 3 に示したが、レーザーアニール後に電流密度低減と磁壁移動速度向上に成功している。さて、パルス電流印加で生ずる温度勾配の影響を調べるために異常ネルンスト効果を調べた。結果を図 4 に示すが、異常ネルンスト電圧は小さく磁壁移動への影響も小さいと確認できた。この他、パルス電流で磁壁が動く際生じる逆起電力(スピン起電力: Spin motive force)の磁壁駆動への影響を調べた。結果を図 5 に示す。スピン起電力は、他機関の結果より 3 桁も大きいことが分かった。しかし、生ずる起電力は小さく、磁性細線メモリ動作には障害とならないことが確認できた。最後に、SOT を支配している伝導電子のヘテロ界面での影響を光学領域で調べた。結果を図 6 に示す。DMI や SHE の大きな Pt ヘテロ界面では伝導現象に起因する低エネルギー側の誘電率の非対角成分の実部および虚部がバルク TbCo と大きく異なっている。一方、DMI や SHE の小さな Cu ヘテロ界面ではこのような顕著な変化が見られない。したがって、このヘテロ界面の伝導電子への影響はテラヘルツ領域でも応用可能であることが分かった。また、ヘテロ界面の影響評価に磁気光学効果測定が利用できることが分かった。

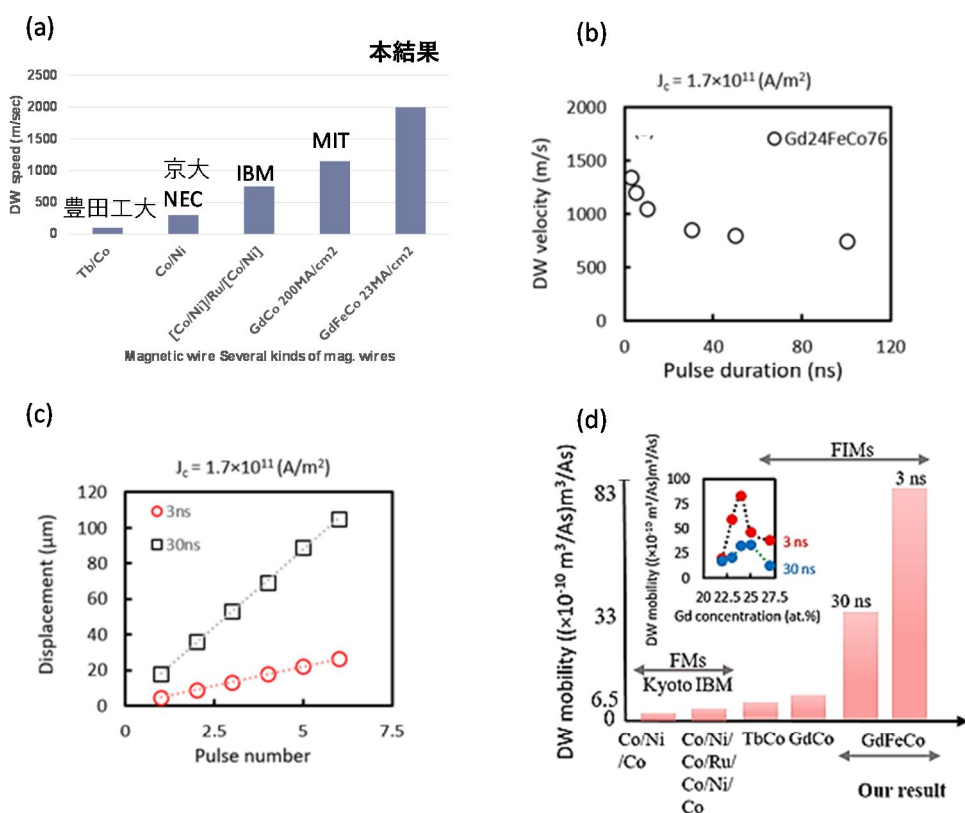


図1 (a) 磁性細線メモリを研究している様々な機関が報告している磁性細線材料における磁壁移動速度比較(外部磁界ゼロ) 本成果のGdFeCo磁性細線の磁壁移動速度が最速。(b)パルス電流密度 $1.7 \times 10^{11} \text{ A/m}^2$ に固定したときの磁壁移動速度の印加パルス幅依存性 (c) 電流密度を $1.7 \times 10^{11} \text{ A/m}^2$ に固定した時の磁壁移動距離の印加電流のパルス数依存性 (d) 様々な研究機関が発表している磁壁移動速度を駆動電流密度で規格化した磁壁移動度の競合比較。本研究結果が右端で、他機関よりも圧倒的に磁壁移動度は大きい。

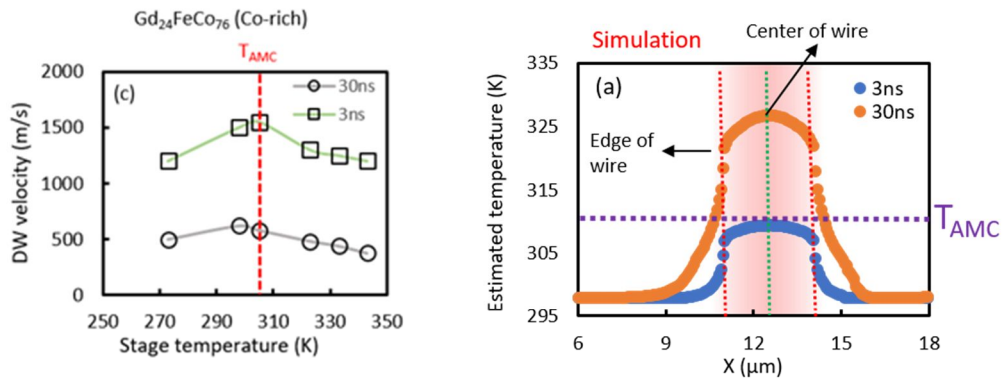


図2 (a) GdFeCo磁性細線に印加する電流のパルス幅を3nsec印加した時の、磁壁移動速度の温度依存性。比較のために、パルス幅30nsecの結果も同図に示した。

(b)パルス幅3nsecと30nsecの電流を印加したときのジュール発熱分布の熱計算結果。温度分布は細線の断面方向のものである。ジュール熱は細線脇に逃げてゆくの、細線中央部が最も高温となる。

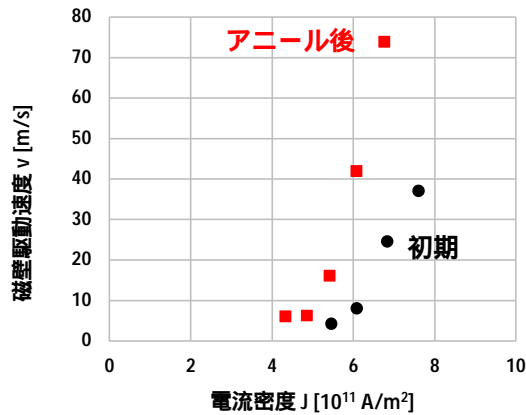


図3 TbCo磁性細線の磁壁移動速度の電流密度依存性。磁壁の移動速度向上を狙って細線をレーザーアニールしたときの磁壁移動速度も同図に示した。その結果、磁壁移動速度向上、駆動電流密度低減にレーザーアニールが有効である。

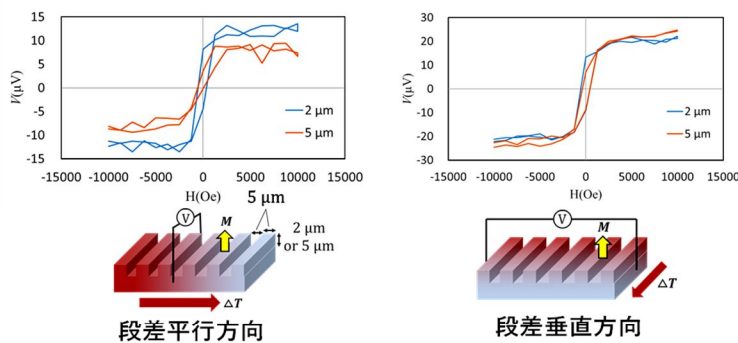


図4 TbCo磁性細線をナノインプリントプラスチック基板に成膜したときの異常ネルンスト効果測定結果。ランド幅とグループ幅はともに5 μm 、溝深さは2 μm と5 μm である。異常ネルンスト電圧測定方向を溝に対して平行と垂直の2種類で測定を行った。磁性細線メモリにおいて、電流印加によるジュール発熱が作る温度勾配が磁壁駆動の妨げになる可能性が考えられる。そこで、その程度を調べるために実験を行ったが、この起電力は小さく、磁壁駆動の妨げにならないことが確認できた。

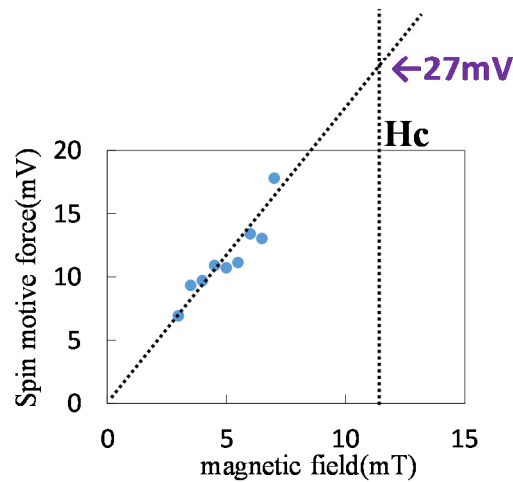
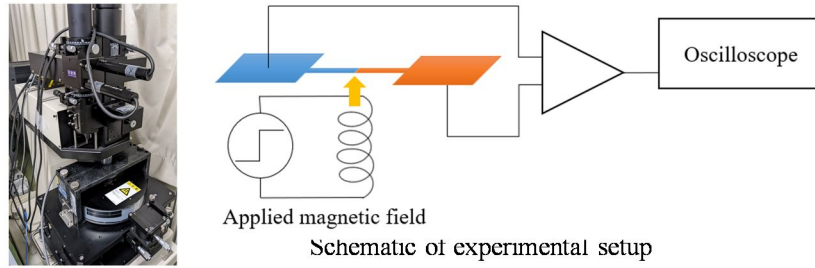


図5 GdFeCo磁性細線をガラス基板上に形成し、細線中央に磁壁を導入し、図上に示す配置でコイルから交流磁界を発生し、その交流磁界で細線上の磁壁が左右に動く。このとき細線両端の電極に生ずる起電力が生じる。この測定結果が下の図である。磁性細線メモリにおいて、磁壁を電流で駆動する際に生じる起電力は駆動電流と逆極性になるので、磁壁駆動の妨げとなる可能性が考えられる。しかし、この実験結果では起電力は小さく、磁性細線メモリとしての磁壁駆動の妨げにならないことが確認できた。

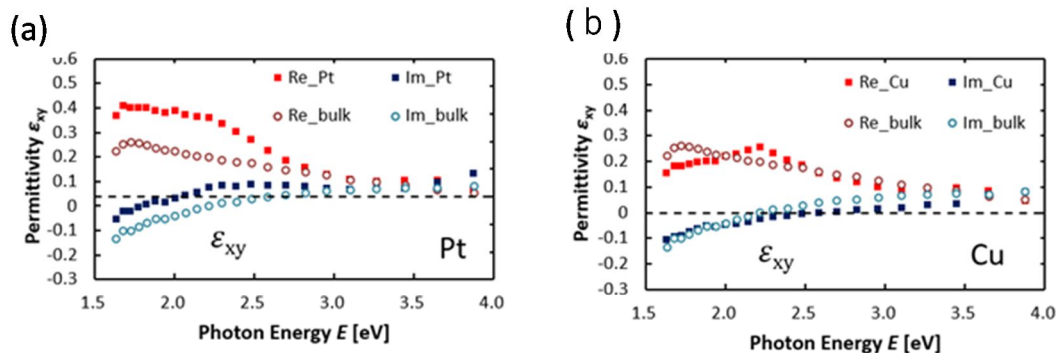


図6 (a) TbCo/Ptヘテロ結合膜に直線偏光を照射し、磁性を担う誘電率の非対角成分実部および虚部の入射光エネルギー依存性。重金属であるPtは大きなSHEとDMIを有する。比較のためにバルクTbCoの誘電率非対角成分実部および虚部も同図に示したが、低エネルギー側でヘテロ界面に生じるスピン軌道相互作用起因の影響で両者に差が生じていることがわかる。一方、SHEとDMIはともに小さいCuを使った同様の実験(b)では全エネルギー領域でPtの時のような差は見られなかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 S. Ranjbar, S. Sumi, K. Tanabe, and H. Awano	4. 巻 11
2. 論文標題 Ultra-thin interfacial domain wall less than 1 nm based on TbxCo100-x/Cu/[Co/Pt]2 heterostructures for multi-level magnetic pillar memory	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 115017
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0072336	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 S. Ranjbar, S. Sumi, K. Tanabe, and H. Awano	4. 巻 7
2. 論文標題 Large Perpendicular Exchange Energy in TbxCo100-x/Cu (t)/[Co/Pt]2 heterostructures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Magnetochemistry	6. 最初と最後の頁 110141
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/magnetochemistry7110141	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 A. Yagmur, S. Sumi, H. Awano, and K. Tanabe	4. 巻 103
2. 論文標題 Magnetization-dependent inverse spin Hall effect in compensated ferrimagnet TbCo alloys	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys.Rev. B	6. 最初と最後の頁 214408
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.214408	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 S. Sumi, H. Awano, and J. Tominaga	4. 巻 12
2. 論文標題 Laser induced spin injection to [GeTe/Sb2Te3] superlattice through a TbFeCo film	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 35328
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/9.0000300	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 S. Sumi, Y. Hirano, H. Awano, and J. Tominaga	4. 巻 7
2. 論文標題 Ferromagnetic Resonance of a [GeTe/Sb ₂ Te ₃] ₆ /Py Superlattice	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Magnetochemistry	6. 最初と最後の頁 156
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/magnetochemistry7120156	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 S. Ota, P. V. Thach, H. Awano, A. Ando, K. Toyoki, Y. Kotani, T. Nakamura, T. Koyama, D. Chiba	4. 巻 11
2. 論文標題 Strain-induced modulation of temperature characteristics in ferrimagnetic Tb-Fe films	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 6237
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-85642-3	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 該当する

[学会発表] 計11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 M. Oikawa, S. Sumi, K. Tanabe, H. Awano
2. 発表標題 Spin motive force due to domain wall motion in GdFeCo magnetic wires
3. 学会等名 2022 Joint MMM-INTERMAG (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Kambe, S. Ranjbar, S. Sumi, K. Tanabe, H. Awano
2. 発表標題 Influence of pulse width and Joule heating on current-induced domain wall motion
3. 学会等名 2022 Joint MMM-INTERMAG (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Sumi, H. Awano, J. Tominaga,
2. 発表標題 Laser induced spin injection to [GeTe / Sb ₂ Te ₃] superlattice through a TbFeCo film
3. 学会等名 2022 Joint MMM-INTERMAG (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鷺見聡、Armet Yagmur, 田辺賢士、粟野博之
2. 発表標題 TbCo/重金属ヘテロ界面のホール効果
3. 学会等名 第60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 明瀬大和、粟野博之、田辺賢士、鷺見聡
2. 発表標題 レーザー掃引フラット磁性細線における磁壁駆動
3. 学会等名 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 和井内琴理、松本憩、A. Yagmur, S. Ranjbar, 鷺見聡、田辺賢士、粟野博之
2. 発表標題 光磁気記録におけるDMIの影響
3. 学会等名 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 久田真人、A. Yagmur, 鷺見聡、田辺賢士、栗野博之
2. 発表標題 TbCo合金とTb/Co多層膜における異常ネルンスト効果の比較
3. 学会等名 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 坂本美雨、鷺見聡、久田真人、S. Ranjbar, A. Yagmur, 田辺賢士、栗野博之
2. 発表標題 ランドグループ基板における異方的異常ネルンスト効果
3. 学会等名 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 松本憩、鷺見聡、田辺賢士、栗野博之
2. 発表標題 磁気工学スペクトルを用いた磁性層/重金属層ヘテロ構造におけるスピン軌道相互作用由来の界面効果の検出
3. 学会等名 IEEE Magnetics Society Nagoya Chapter 若手研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Matsumoto, S. Sumi, Kenji Tanabe, Hiroyuki Awano
2. 発表標題 Detection of Interfacial Effects in Rare Earth Metal Doped Ferrimagnet Layer / Heavy Metal Layer Using Magneto-Optical Kerr Effect
3. 学会等名 The 65th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松本憩、 P. N. Thach、 鷺見聡、 田辺賢士、 粟野博之、 王世浩、 石橋隆幸、 斎藤伸
2. 発表標題 磁性層/重金属層界面における磁気光学Kerr効果の材料依存性
3. 学会等名 第61回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020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
---------------------------	-----------------------	----

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