

令和 2 年 7 月 9 日現在

機関番号：33924

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K14123

研究課題名(和文)革新的微小インダクタ開発

研究課題名(英文)Development of innovative micro inductor

研究代表者

田辺 賢士(Tanabe, Kenji)

豊田工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00714859

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):抵抗,キャパシタ,インダクタは電気回路の基本受動素子である.抵抗やキャパシタは物質中の電子状態に顕著に依存し,電気伝導率や誘電率といった物質固有の示強変数と結びつき,基礎物理,応用物理の両面から活発に研究されている.一方でインダクタは,古典電磁気学に基づいたコイル型構造から大きな進展はなく,インダクタの新しい原理が求められる.そこで我々は,非線形伝導由来の新しいインダクタ開発を目指して研究を行った.まず分子性結晶を用いて,1000 Hを超える巨大なインダクタンスの観測に成功した.つぎにGe薄膜を用いて,実験を行うことで,基板の影響,特に基板の熱伝導率が重要になることが明らかになった.

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究はこれまでのインダクタとは異なる,非線形伝導に由来した新しいインダクタ開発を目指したものである.このインダクタは従来型とは異なる様々な特徴を有している.まず大きなインダクタンスを得ることが可能であり,また微細化することも可能である.一方,問題点は,周波数帯域があまり大きくならないこと,低温で実験が行われた点である.この2つの課題を今後解決することで,微細で,大きなインダクタンスを有するデバイスが実現することが期待される.

研究成果の概要(英文):The resistor, capacitor, and inductor are essential passive elements in modern electronic circuits. The resistor and capacitor, related to microscopic electronic states, have been explored in the fields of both fundamental and applied physics as a conductivity and permittivity, respectively. The inductor, which is composed of a coil, has progressed little since more than one hundred years ago and requires relatively large volume. Therefore, a breakthrough allowing the replacement of coil-type inductors has been desired. Here, we have studied the nonlinear-conduction type inductor. Firstly, we succeeded in detection of huge inductance of more than 1000 using the molecular crystal. Secondly, we have studied inductance in the Ge films. We find that the influence of the substrate, including thermal conductivity, is essential.

研究分野:非線形伝導

キーワード:非線形伝導 インダクタ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

抵抗、キャパシタ、インダクタは電気回路の基本受動素子である。抵抗やキャパシタは物質中の電子状態に顕著に依存し、電気伝導率や誘電率といった物質固有の示強変数と結びつき、基礎物理、応用物理の両面から活発に研究されている。一方でインダクタは、古典電磁気学に基づいたコイル型構造から大きな進展はなく、基礎物理からの発展はほぼない。しかし今後、ウェアラブルデバイスなどの超小型デバイスの増加に伴い、一定以上の容積を必要とするコイル型構造を脱するインダクタの新しい原理が求められる。

物質に電圧印加した際、抵抗値が低下する現象を非線形伝導と呼ぶ(抵抗値が変化しない場合はオームの法則そのもの)。この応答は必ず一定時間遅れるために、電圧印加に対して抵抗値が遅れて低下し、同時に電流が遅れて上昇することになる。この振る舞いはインダクタンスに他ならない。そこで我々はこの非線形伝導の振る舞いを新たにインダクタンス発現の原理として提案した。まず我々が考えたのはステップ状の電流を非線形伝導が起きる物質に印加した際の応答である。非線形伝導特性を持つ物質に電流 I_0 を印加している状態から電流値 $I_1 (= I_0 + \delta I)$ に変化させたとすると、電圧値は V_0 から $(V_0/I_0)I_1$ に変化する。これは因果律の関係から、時間遅れなしで非線形伝導の応答ができないためである。一方しばらくすると非線形伝導が生じIV曲線上の点 V_1 に変化することが予想できる。このときこの電流印加に対する電圧応答の関係

$$I[t] = I_0 + \delta I \theta[t]$$

$$V[t] = V_0 + (V_1 - V_0)\theta[t] + \delta V f[t]$$

を利用することでフーリエ変換によって交流抵抗とインダクタンスを計算することが可能になる。ここで $\theta[t]$ はステップ関数で、 $f[t]$ は非線形伝導の応答関数である。これらをフーリエ変換してまとめると

$$L[\omega] = \left(\frac{\delta V}{\delta I}\right) \cdot \text{Re} \left(\int_{-\infty}^{\infty} f[t] e^{-i\omega t} dt \right)$$

$$R_{ac}[\omega] = \frac{V_1 - V_0}{\delta I} - \omega \left(\frac{\delta V}{\delta I}\right) \cdot \text{Im} \left(\int_{-\infty}^{\infty} f[t] e^{-i\omega t} dt \right)$$

となる。非線形伝導の応答関数 $f[t]$ が指数関数で表現でき($f[t] = \exp(-t/\tau)$)、微分抵抗がゼロになるように調整できればこれらの式は、

$$L[\omega] = R_{dc} \left(\frac{\tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \right)$$

$$R_{ac}[\omega] = R_{dc} \left(\frac{\omega^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} \right)$$

と極めてシンプルな形に書き換えることができる。さらにインダクタンスを評価するQ値は

$$Q[\omega] = \frac{1}{\omega \tau}$$

となる。この結果はインダクタンスが非線形伝導の応答速度 τ^{-1} より低い周波数領域で周波数に依存しない大きなインダクタンスが発現することと、周波数が低ければ低いほど大きなQ値を手に入れることができることを表している。そこで我々は非線形伝導が発現することで知られる Ca_2RuO_4 を用いて本予測の実証実験を行い、38 Hに達する巨大なインダクタンスと、20を超えるQ値を手に入れることに成功している[K. Tanabe et al., APEX 10, 081801 (2017)]。

2. 研究の目的

現代のエレクトロニクスの発展において、デバイスの小型化は重要なファクターである。インダクタは3つの基本受動素子の1つであるにもかかわらず、100年以上も前に開発されたコイル型構造をいまだに利用している。微細化に向かないコイル型構造を脱却するために新しい原理のインダクタの提案が切望されている。そこで我々は物質の非線形伝導に関する新しい原理のインダクタを提案した。このインダクタは、微細化可能で、巨大なインダクタンス、巨大なQ値（インダクタンスの特性の目安：角周波数×インダクタンス/抵抗.）、能動的素子特性を有することが期待される。これまでの研究でCa₂RuO₄の単結晶を用いて40 Hを超えるインダクタンスの観測に成功している。しかしその周波数帯域は1 Hz程度と、極めて低い周波数にとどまっている。そこで本研究ではより高周波帯域までインダクタンスの発現を目指すことと、微細化したインダクタ開発を目指すことを目標とした。

3. 研究の方法

実験ではβ-(meso-DMBEDT-TTF)₂PF₆の単結晶を利用した(図1参照)。分子性結晶は熱収縮率が、電極として一般的に利用する銀ペーストと比較して大きく、しばしば破損する可能性があるため、カーボンペーストを利用した。β-(meso-DMBEDT-TTF)₂PF₆は電流電圧特性を調べると70 K以下で負性微分抵抗が表れるため、電流値が電圧の多価関数となってしまい、電圧で制御することができない。しかし交流測定利用するLCRメーターは電圧を制御変数としているため本実験ではサンプルの抵抗より十分大きな100 kΩ抵抗を直列に挟んで測定を行い、最後にこの抵抗分を補正するという手法を用いた。温度制御には日本カンタムデザインの物理特性測定装置(PPMS)を利用した。さらに微細化したインダクタを実現するために、Si基板上にスパッタ装置を用いて、Ge薄膜を作製した。X線回折装置により、結晶化を確認後、本薄膜を利用してIV測定を行った。

4. 研究成果

図2に示しているのは65 Kで観測されたインダクタンスの周波数依存性である。理論計算が予想する通り、直流バイアスがゼロではインダクタンス成分は出現しないが、直流バイアスを上げていくとインダクタンス成分が発現しているのがわかる。またこのインダクタンスの大きさは1000 Hを超えている。この数字は通常のコイル型インダクタンスがμH-mHであることを考えると飛躍的に大きい。一方でインダクタンス成分が周波数に依存して大きく変化してしまっているという欠点がある。これは先行研究で考えたように、非線形伝導の応答速度が遅いことと対応している。応答速度に関しては後に議論するが、先行研究

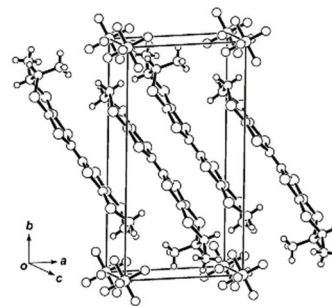


図1 β-(meso-DMBEDT-TTF)₂PF₆の結晶構造 meso-DMBEDT-TTF分子が層状に積層しており、この方向に電子は伝導する。図はChemical Communicationから転載した(Chem. Commun. 21, 2454 (2004))。

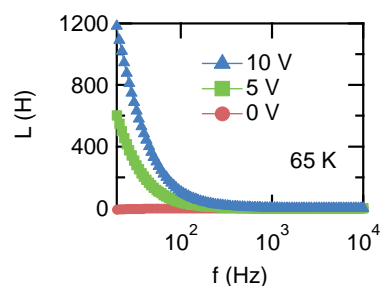


図2 インダクタンスの周波数依存性。65 Kで、100 kΩの標準抵抗を直列に繋いだ状態で測定されたインダクタンス成分。色の違いは印加した直流電圧の違いを表す。

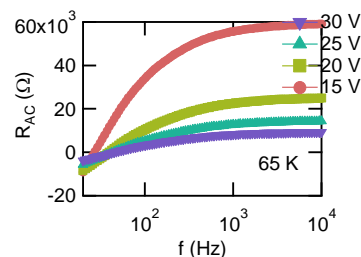


図3 抵抗の周波数依存性 65 Kで、100 kΩの標準抵抗を直列に繋いだ状態で測定された交流抵抗成分。標準抵抗分は測定後差し引かれた。色の違いは印加した直流電圧の違いを表す。

の Ca_2RuO_4 よりも 2 桁程度速くなっているものの更なる応答速度の向上が望まれる結果である。

図 3 は交流抵抗の周波数依存性を示している。まず直流バイアス印加に対して交流抵抗が低下しているのが見て取れる。これは非線形伝導によって電圧印加に対して直流抵抗低下していることに対応する。また低周波域にかけて交流抵抗は低下しており、これはインダクタンスの発生と対応している。それ故、交流抵抗が低下する典型的な周波数がより高周波域にあれば交流抵抗が十分下げることができると予想される。一方で交流抵抗はある周波数以下で負になっている点が見

つかった。インダクタンスの特性が評価するパラメータ (Q 値) はインダクタンスの大きさと交流抵抗の比で評価されるために、ある周波数帯域で交流抵抗がゼロになり、Q が発散することを意味する。Q 値の発散現象を調べるために 20 - 30 Hz の領域を細かく測定した (図 4)。23 Hz 近傍で Q 値が飛躍的に上昇しているのがわかる。その最大値は 3000 を超えており、コイル型インダクタでは実現しえない数値となっている。

最後に非線形伝導の応答速度と単一緩和について考察する。先行研究では非線形伝導の応答が指数関数的単一緩和と仮定していた。このような単一緩和ではインピーダンスの実部と虚部表記 (Cole-Cole plot) にすると半円が現れる。しかし図 5 のように実際のデータは半円ではなく、半円の一部である円弧の形をしている。我々は誘電率の緩和現象の議論を使ってこのインダクタンス特性を解析する。まず誘電率は印加する電場に対して電気双極子が応答し、電場方向に揃う。この時電気双極子の応答が指数関数的単一緩和である場合、

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \frac{1}{1 + i\omega\tau}$$

と書け、この式をデバイの式と呼ぶ。Cole-Cole plot を行えば、完全な半円になる。一方、単一緩和でない場合、この半円からずれ、修正されたデバイの式が多数提案されている。最も一般的なのは、Cole-Cole plot が円弧になる Cole-Cole の式である。この式はデバイの式を

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^{1-\alpha}}$$

と修正したものであり、 α が単一緩和モデルからのずれを示すパラメータである。そこでこの誘電率の議論をインダクタンスに適用してみる。インダクタンスの単一緩和モデルの式は

$$Z = Z_0 + Z_1 \frac{i\omega\tau}{1 + i\omega\tau}$$

と書けるため、この式を Cole-Cole の式に習って

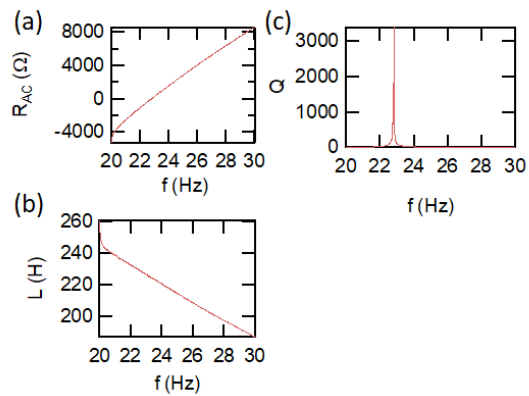


図 4 20 - 30 Hz における交流抵抗 (a)、インダクタンス (b)、Q 値 (c) の周波数依存性。55 K で、直流バイアス 15 V 印加下で 100 kΩ の標準抵抗を直列に繋いだ状態で測定された。標準抵抗分は測定後差し引かれた。

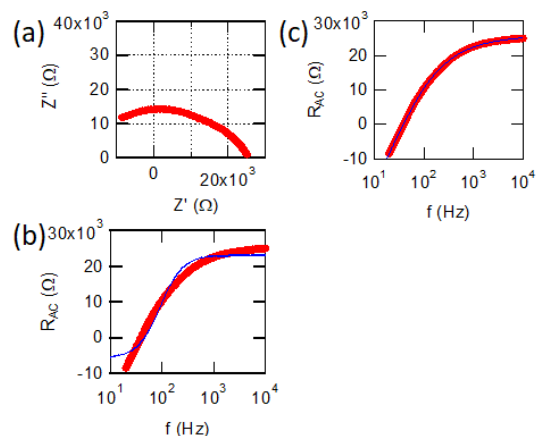


図 5 20 - 30 Hz における交流抵抗 (a)、インダクタンス (b)、Q 値 (c) の周波数依存性。55 K で、直流バイアス 15 V 印加下で 100 kΩ の標準抵抗を直列に繋いだ状態で測定された。標準抵抗分は測定後差し引かれた。

$$Z = Z_0 + Z_1 \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^{1-\alpha}}$$

と修正する .ただし が単一緩和モデルからのずれを示すパラメータであり , が2からずれるほど単一緩和モデルからずれることを意味する .実際に交流抵抗の実験データを使って ,単一緩和モデルの式

$$R = R_0 + R_1 \frac{\omega^2\tau^2}{1 + \omega^2\tau^2}$$

と修正 Cole-Cole の式

$$R = R_0 + R_1 \frac{[1 + (\omega\tau)^{1-\alpha} \sin(\alpha\pi/2)]}{1 + 2(\omega\tau)^{1-\alpha} \sin(\alpha\pi/2) + (\omega\tau)^{2(1-\alpha)}}$$

でフィッティングを試みた .実際の結果が図5に示されている .図から明らかなように修正 Cole-Cole の式の式で見事に一致していることがわかる .このフィッティング結果から得られた非線形伝導の応答時間 は5.99 ms である .この値は先行研究で用いた Ca_2RuO_4 の応答速度より2桁程度速いが応用に向けてさらなる向上が求められる .

次に室温でのインダクタ開発を目指すために Ge 薄膜を用いて ,素子作製を行った .まずスパッタ法を用いてシリコン基板上に Ge 薄膜を成膜した .このときメタルマスクを用いて ,マイクロスケールのデバイスを作製した .図6に示すのはその X 線回折データであり ,多結晶は薄膜の作製に成功しているのがわかる .さらに本素子を用いて電流電圧特性を評価した .その結果が図7であり ,線形の IV 特性が得られているのがわかる .印加電圧は ,最大値の上限である 50V まで印加したにもかかわらず ,非線形の伝導特性は得られていない .簡単な計算ではジュール熱により ,100 K 以上の上昇が見込まれていた .この原因は基板である Si の熱伝導率が高すぎ ,熱が逃げてしまったためであると思われる .そこでこの仮説を確認するために ,熱伝導率が低い SiO_2 のガラス基板を用いて Ge 薄膜素子を作製した .この素子の IV 測定結果が図8である .図でわかる通り ,非線形伝導が生じているのがわかる .非線形伝導が生じなかった Ge 薄膜と比較するとその違いは ,基板だけであり ,基板の熱伝導率が重要な役割を生み出しているのがわかる .さらに ,基板の影響をなるべく排除するために , SiN のメンブレン基板を使って実験を行ったものの ,メンブレン基板の耐熱温度の範囲では Ge の結晶化は確認できなかった .基板の影響を排除するためには ,メンブレン基板を用いるのではなく ,エッチングによって ,加工して作製する必要があった .

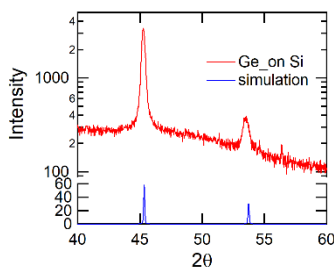


図6 Ge 薄膜の X 線回折データ

Ge に対応する結晶ピークが確認できる .

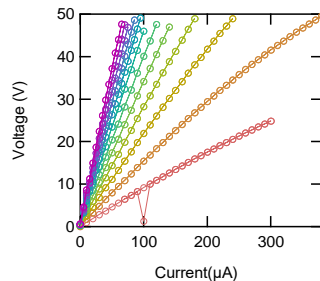


図7 Si 基板上の Ge の IV 測定

測定は室温で行った .色の違いは ,素子の電極間距離の違いを表す .最大電圧 50 V の電源を用いたものの ,非線形伝導は確認されていない .

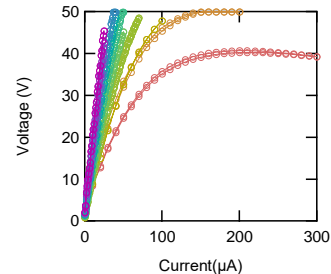


図8 SiO_2 ガラス基板上の Ge の IV 測定

測定は室温で行った .色の違いは ,素子の電極間距離の違いを表す .最大電圧 50 V の電源を用い ,非線形伝導が確認された .

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tanabe Kenji, Yamada Keisuke	4. 巻 11
2. 論文標題 Influence of the Dzyaloshinskii-Moriya interaction on the topological Hall effect in crossed nanowires	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 113003 ~ 113003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/APEX.11.113003	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 Tanabe Kenji	4. 巻 124
2. 論文標題 Influence of carrier diffusion on photo-Seebeck effect in zinc oxide	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 035108 ~ 035108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5040033	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 Y. Shiraishi, K. Tanabe, H. Taniguchi, R. Okazaki, and I. Terasaki	4. 巻 126
2. 論文標題 Interplay between quantum paraelectricity and thermoelectricity in the photo-Seebeck effect in a SrTiO ₃ single crystal	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 045111-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5106384	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. Fukuda, H. Awano, and K. Tanabe	4. 巻 116
2. 論文標題 Observation of spin-motive force in ferrimagnetic GdFeCo alloy films	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 102402-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0002802	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19件(うち招待講演 0件/うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Takuya Sawa、 Satoshi Sumi、 Pham Van Thach、 Kenji Tanabe、 Hiroyuki Awano
2. 発表標題 Observation of Thermal Distribution in Magnetic Wire Under Current Injection
3. 学会等名 Magnetics and Optics Research International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kei Matsumoto、 Satoshi Sumi、 Kenji Tanabe、 Hiroyuki Awano
2. 発表標題 Magneto-Optical Effect in Magnetic Layer / Heavy Metal Layer Hetero-Structure
3. 学会等名 Magnetics and Optics Research International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akira Takahashi、 Satoshi Sumi、 Pham Van Thach、 Kenji Tanabe、 Yuichiro Kurokawa、 Hiroyuki Awano
2. 発表標題 Does Spin Orbit Torque also Work on Current Driven Domain Wall Motion of Thick GdFeCo (500 nm) Single Layer Magnetic Wire without Heavy Metal Pt Layer?
3. 学会等名 Magnetics and Optics Research International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenji Tanabe、 Satoshi Sumi、 Hiroyuki Awano
2. 発表標題 Spinwave tunneling effect at heterojunction
3. 学会等名 Magnonics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Matsumoto、Pham Van Thach、S. Sumi、Kenji Tanabe、Hiroyuki Awano
2. 発表標題 Observation of interfacial effects at Pt/GdFeCo interface using magneto-optical Kerr effect
3. 学会等名 The 10th Joint European Magnetic Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 澤拓哉、鷲見聡、田辺賢士、栗野博之
2. 発表標題 電流磁壁駆動磁性細線の温度分布測定
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福田舜、鷲見聡、田辺賢士、栗野博之
2. 発表標題 垂直磁気異方性によるスピン起電力の増大
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久田真人、鷲見聡、田辺賢士、栗野博之、松本憩
2. 発表標題 [TbCo]/Pt, [TbCo]/Cuヘテロ接合膜の磁気熱電効果
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Takahashi、 S. Sumi、 Pham Van Thach、 Kenji Tanabe、 Y. Kurokawa、 Hiroyuki Awano
2. 発表標題 Unusual phenomenon in which domain walls move in the current direction by STT in thick GdFeCo wire w/o heavy metal interface
3. 学会等名 The 64th Magnetism and Magnetic Materials
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 永田裕資、 田辺賢士、 栗野博之
2. 発表標題 GdFeCo薄膜における磁気パブルの生成および電流誘起磁壁移動
3. 学会等名 IEEE Magnetism Society Nagoya Chapter 若手研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 澤拓哉、 鷲見聡、 田辺賢士、 栗野博之
2. 発表標題 電流磁壁駆動型磁性細線の熱分布の観察
3. 学会等名 IEEE Magnetism Society Nagoya Chapter 若手研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 久田真人、 鷲見聡、 田辺賢士、 栗野博之
2. 発表標題 [TbCo]/Pt, [TbCo]/Cuヘテロ接合膜の磁気熱電効果
3. 学会等名 IEEE Magnetism Society Nagoya Chapter 若手研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松本 颯、 鷲見 聡、 田辺 賢士、 栗野 博之
2. 発表標題 磁性層/重金属層ヘテロ構造における磁気光学効果
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 田辺 賢士、 アハメット ヤグムア、 栗野 博之、 正木 信也、 山田 啓介、 嶋睦 宏
2. 発表標題 ポリマー膜を利用したスピitzerバック発電の高効率化
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 福田 舜、 鷲見 聡、 田辺 賢士、 栗野 博之
2. 発表標題 フェリ磁性体GdFeCoの磁性共鳴によるスピン起電力
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 鷲見 聡、 田辺 賢士、 栗野 博之
2. 発表標題 TbCo結晶膜のスピンゼーバック効果
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 久田真人、 鷲見聡、 田辺賢士、 栗野博之
2. 発表標題 [TbCo]/Pt, [TbCo]/Cuヘテロ接合膜の磁気熱電効果
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 永田裕資、 パム バン タック、 鷲見聡、 田辺賢士、 栗野博之
2. 発表標題 GdFeCo磁性細線における磁気バブルの生成および電流駆動
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 Ahmet Yagmur, Pham Van Thach, Satoshi Sumi, Hiroyuki Awano, Kenji Tanabe
2. 発表標題 Spin Seebeck and anomalous Nernst effects in TbCo/Cu/YIG devices
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

〔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
---------	---------------------------	-----------------------	----