

令和 4 年 9 月 13 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16H04378

研究課題名（和文）室温動作のセンサで最高感度を有する高周波駆動薄膜磁界センサの開発と生体磁気計測

研究課題名（英文）Development and biomagnetic measurement of high-frequency drive thin-film magnetic field sensor with the high sensitivity operating at room temperature

研究代表者

藪上 信（Yabukami, Shin）

東北大学・医工学研究科・教授

研究者番号：00302232

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,700,000円

研究成果の概要（和文）：室温で動作し10⁻³T（テスラ）台の磁界検出分解能を有する高周波駆動薄膜磁界センサモジュールを開発した。インピーダンス整合を考慮するデバイス構造にすることで高感度化することを示した。超伝導量子干渉素子（SQUID）に匹敵する高感度とコンパクト性を両立し、室温動作の薄膜磁界センサとして最高レベルのSN比であることを示し、生体磁気計測（心磁界計測）に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

実用化できれば、脳梗塞の原因とされる心房細動（患者数は国内で推定130万人）を一般病院で診断可能になる。P波はQRS波よりも約1桁小さな信号であり、SQUIDのみで計測可能であることから普及は限定的であった。一般病院等で脳磁界計測による脳内イメージングが可能となり医療（てんかん、外科手術前検査等）および脳科学両面から画期的である。ウェアラブルなセンサシステムに最適な構成であり、日常的に、非接触で、心磁界を計測することで、突発的な心疾患（例えばST偏位等）を検出可能となる。ヘルスケア等の健康チェックに応用可能である。

研究成果の概要（英文）：We have developed a high-frequency drive thin-film magnetic field sensor module that operates at room temperature and has a resolution of magnetic field detection in the 10E-13 T (tesla) range. We have succeeded in biomagnetic measurement (cardiac magnetic field measurement) by showing that it has the highest SN ratio as a thin film magnetic field sensor that operates at room temperature and has both high sensitivity and compactness comparable to that of a superconducting quantum interference device (SQUID).

研究分野：磁気工学、計測工学

キーワード：生体磁気計測 磁界センサ 高周波駆動

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

心磁界、脳磁界等の生体磁気信号は生体細胞の興奮、脳の神経活動に起因する微弱磁界であり、その強度は地磁気の1/100万～1/1億程度である。生体磁気信号の計測は心臓疾患、てんかんの診断、外科手術時の神経活動部位の把握、脳機能の解明等で重要な役割を担っている。しかしこれらの生体磁気信号は極めて微弱であるため、その計測は1台数億円の超伝導量子干渉素子(SQUID磁束計)と磁気シールドルームを用いなければ不可能であった。申請者はこれまで室温で動作する高周波駆動薄膜磁界センサを開発し、磁気シールドなしで健常者の多点心磁界計測(16点)に成功した。他の室温動作の磁界センサ(フラックスゲートセンサ、TMRセンサ、MIセンサ等)により生体磁気計測の研究も進められている。申請者らの磁界センサは他に比較して、最も高周波のキャリアを使用するため、原理的に多くの信号磁界を変調可能であり、室温動作の薄膜磁界センサとして最高のSN比を有することを実証する。

2. 研究の目的

室温で動作し 10^{-13} T(テスラ)台の磁界検出分解能を有する高周波駆動薄膜磁界センサモジュール(薄膜センサ、発振器(IC)、処理回路(IC)で構成)を開発。SQUIDに匹敵する高感度とコンパクト性を両立。室温動作の薄膜磁界センサとして最高のSN比であることを実証する。

3. 研究の方法

- (1)センサ素子:3次元積層構造、ナノグラニューラ薄膜適用、インピーダンス整合を考慮した磁性薄膜等のセンサ構造最適化で高感度化
- (2)センサモジュール:集積化センサ、処理回路、発振器をFPGA等を用いてモジュール化
- (3)応用技術の開発:生体磁気計測システム開発および心磁界計測

4. 研究成果

(1)有限要素法に基づくセンサの高感度化の設計指針を確立し、室温動作の薄膜磁界センサにより磁気シールドなしで心磁界波形の多点計測(16点)に成功した。センサ素子の高周波特性と磁界に対する応答性を定量的に把握することを目的として、構造および動作が比較的単純な直線コプレーナ構造の薄膜磁界センサを作製し、磁界に対するSパラメータ等の変化を測定した。並行して、試作センサを有限要素法によりモデル化し、高周波域での磁界印加に対するSパラメータ等を解析し、実測値と比較した。その結果、実測値と解析値がおおむね対応し、動作メカニズムを把握することができ、透過係数(S_{21})の減衰に関する原因を明らかにするとともに、インピーダンス整合により透過係数(S_{21})の増大によりSN比の向上に関する知見が得られた。アモルファスCoNbZr薄膜とSrTiO薄膜を組み合わせた直線コプレーナ線路構造の薄膜磁界センサを微細加工プロセスにより作製した。同寸法のセンサ素子に対して三次元有限要素法電磁界解析を用いて、CoNbZr薄膜の強磁性共鳴、渦電流損等の周波数依存性を考慮した解析を行い、センサ素子の高周波インピーダンスを求めた。実測値と理論値は磁界依存性、周波数依存性ともに良好に対応し、本解析法の有効性を示した。試作したセンサ素子ではCoNbZr薄膜によるインピーダンス不

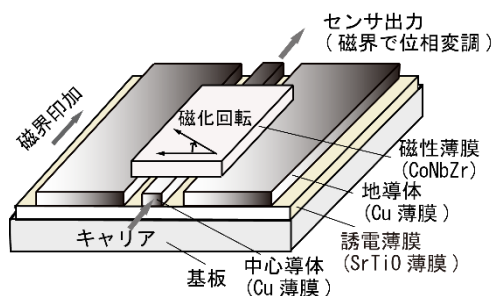


図1 高周波駆動薄膜磁界センサ(コプレーナ構造) 磁性薄膜と伝送線路により構成。磁界印加により磁化回転、透磁率変化を介して高周波キャリアを振幅・位相変調。表皮効果、強磁性共鳴が磁界に敏感であることに加え、高周波駆動(数GHz帯)による高いSN比の変復調が可能であることから、室温動作の薄膜磁界センサとしては最も高感度と考えている。

整合による反射が支配的であり、これが透過係数(S_{21})の減衰の主要因であることがわかった。

(2)伝送線路および磁性薄膜を薄膜プロセスにより一体化したミアンダコプレーナ構造の集積化薄膜磁界センサを作製し、バイアス電流を磁性薄膜直下にセンサ素子に一体化させた電極へ通電させた。設計段階で有限要素法による静磁界解析を行い、バイアス通電によるCoNbZr薄膜内部のバイアス磁界の均一性は1%未満になることが見積もられた。アモルファスCoNbZr薄膜、SrTiO薄膜およびバイアス印加用電極を組み合わせたミアンダコプレーナ線路型薄膜磁界センサを薄膜プロセスにより一体的に作製した。センサへのバイアス通電方法により-40 dB以上のゲインを得るための位相変化の最高感度は約146 degree/Oeであった。実際の磁界検出動作を想定して、バイアス通電した状態で外部磁界に対する応答性を評価し、目標として設定した100 degree/Oe以上の位相変化感度を満たした。提案するバイアス通電によりバイアス磁界印加と同等の高感度が得られることが示された。同一センサをバイアス磁界印加により動作させた場合の感度とおおまかに対応した。センサ素子の磁性薄膜へ直接バイアス電流を通電する方式および導体薄膜へ通電する方式のセンサ素子を開発し、高感度化と低消費電力を両立出来ることを示した。

(3)伝送線路および磁性薄膜を薄膜プロセスにより一体化した直線コプレーナ構造の薄膜磁界センサを作製し、フリップチップボンディングによりインピーダンス整合を極力維持できるモジュールを開発した。1.5 GHz程度までの帯域であればセンサ素子単独とフリップチップボンディングで実装したセンサの高周波特性、磁界に対してほぼ同等の感度等が得られた。フリップチップボンディングにより実装したセンサにおいてキャリア信号の振幅と位相差における感度の相違点、CoNbZr薄膜の膜厚に対する感度の依存性等について明らかとした。アモルファスCoNbZr薄膜とSrTiO薄膜を組み合わせた直線コプレーナ線路薄膜磁界センサを薄膜プロセスにより一体的に作製し、フリップチップボンディングによるモジュールを開発した。フリップチップボンディング後のセンサ素子では1.8 GHz付近に共振が見られ、帯域が制限された。これはプリント基板の不整合部分の影響と考えられる。CoNbZr薄膜の膜厚が1 μm 厚の際、位相変化感度・振幅変化感度は最も高くなった。センサ素子とフリップチップボンディング後で感度はほぼ等しかった。フリップチップボンディングを用いたインピーダンス整合型のセンサモジュールを開発し、FPGAを用いた信号処理回路と組み合わせて、小型化センサモジュールを開発し、磁気シールドルームを使用せずに10 pT/Hz以下の高感度化・低ノイズ化を示した。さらに有限要素法に基づくセンサの高感度化の設計指針を確立した。磁性薄膜へスリットを設けた構造にすることにより、インピーダンス整合によるキャリア信号の低下抑制と高感度化を実現するセンサ素子を開発した。これらにより磁気シールドルーム外で多点心磁界計測に成功した。

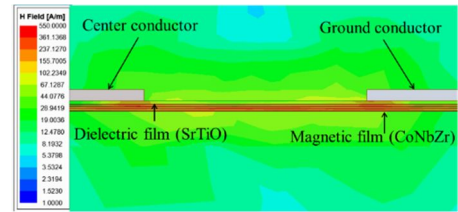


図2 電磁界解析による磁界分布 センサ間の静電容量等を評価し、CoNbZr薄膜によりセンサの特性インピーダンスが不整合になっていること、CoNbZr薄膜にスリットを設けることでインピーダンスが改善されることを示した。

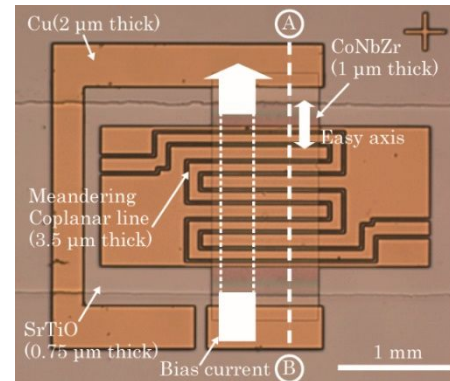


図3 センサ用CoNbZr薄膜にバイアス電流を通電させる一体化高周波駆動薄膜磁界センサ(コプレーナ構造)を作製した。低消費電力によりセンサ実用化に有用な指針が得られた。

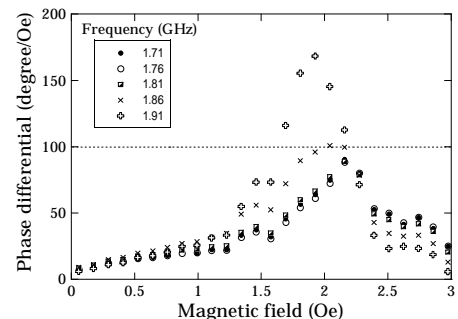


図4 センサ用CoNbZr薄膜にバイアス電流を通電させる一体化高周波駆動薄膜磁界センサ(コプレーナ構造)を作製した。低消費電力によりセンサ実用化に有用な指針が得られた。

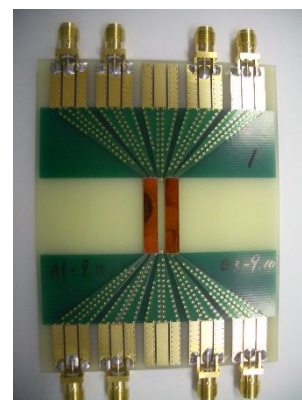


図5 フリップチップボンディングによるセンサモジュール。モジュール全体でインピーダンス整合を考慮することで、1.5GHz帯域を確保した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10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 Yasushi Endo, Osamu Mori, Yutaka Shimada, Shin Yabukami, Shigeyuki Sato, Ryoichi Utsumi	4. 巻 112
2. 論文標題 Study on measurement technique for magnetization dynamics of thin films	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 -
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 森 修, 遠藤 恭, 島田 寛, 藪上 信, 内海 良一	4. 巻 2
2. 論文標題 ウェハレベルの磁性薄膜における高周波磁気透磁率・磁歪定数評価法の開発	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本磁気学会論文特集号	6. 最初と最後の頁 52-55
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 Ranajit Sai, M. Sato, S. Takeda, S. Yabukami, and M. Yamaguchi	4. 巻 459
2. 論文標題 Co/Ti-substituted SrM-based composite sheets: high frequency permeability and electromagnetic noise suppression above 6 GHz	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Magnetism and Magnetic Materials	6. 最初と最後の頁 49-56
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 S. Yabukami, K. Kusunoki, H. Uetake, H. Yamada, T. Ozawa, R. Utsumi, T. Moriizumi, and Y. Shimada	4. 巻 41
2. 論文標題 Permeability Measurements of Thin Film Using a Flexible Microstrip Line-Type Probe Up To 40 GHz	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of the Magnetism Society of Japan	6. 最初と最後の頁 25-28
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 Hiroaki Kikuchi, Suguru Oe, Hiroaki Uetake, and Shin Yabukami	4. 巻 7
2. 論文標題 Behavior of sensitivity at edge of thin-film magnetoimpedance element	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 AIP ADVANCES	6. 最初と最後の頁 0566021-0566025
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 Hiroaki Kikuchi, Chihiro Sumida, Hiroaki Uetake, Shin Yabukami, Shuichiro Hashi, and Kazushi Ishiyama	4. 巻 7
2. 論文標題 Analysis of thin-film magnetoimpedance behavior in low MHz regions based on domain wall equation and bias susceptibility theory	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 American Institute of Physics	6. 最初と最後の頁 0566171-0566176
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 薮上 信, 植竹宏明, 森谷健太, 富並 剛, 小野寺英彦	4. 巻 137
2. 論文標題 バイアス通電によるミアンダコプレーナ薄膜磁界センサの開発	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 電気学会論文誌A (基礎・材料・共通部門誌)	6. 最初と最後の頁 460-465
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 Yutaro Osaki, Shuichiro Hashi, Shin Yabukami, Hiroyasu Kanetaka, and Kazushi Ishiyama	4. 巻 17
2. 論文標題 Wireless Magnetic Position-Detection System With Four Excitation Coils	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE SENSORS JOURNAL	6. 最初と最後の頁 4412-4419
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 Kenji Ikeda, Nobukiyo Kobayashi, Ken-Ichi Arai, Shin Yabukami	4. 巻 446
2. 論文標題 Magnetoelectric effect in nanogranular FeCo-MgF films at GHz frequencies	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Magnetism and Magnetic Materials	6. 最初と最後の頁 80-86
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 Hiroaki Kikuchi, Takuya Shima, Hiroaki Uetake, and Shin Yabukami	4. 巻 7
2. 論文標題 Magneto-Impedance of Micromachined Thin Films Less Than 100 μm in Length	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 IEEE MAGNETICS LETTERS	6. 最初と最後の頁 6508105 1-5
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28件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 S. Yabukami, H. Onodera, Y. Sato, K. Miyauchi, G. Endo, M. Fukuya, H. Kanetaka, Y. Miura, H. Takahashi, T. Kodama
2. 発表標題 Evaluation of bacteria using switching magnetic field.
3. 学会等名 The Third International Workshop on Magnetic Bio-Sensing
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 工藤春陽, 植竹宏明, 小野寺英彦, 藪上 信, 早坂淳一, 荒井賢一
2. 発表標題 フリップチップボンディングによる高周波駆動薄膜磁界センサ
3. 学会等名 スピニクス特別研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 工藤春陽, 植竹宏明, 小野寺英彦, 藪上 信, 早坂淳一, 荒井賢一
2. 発表標題 フリップチップボンディングによる高周波駆動薄膜磁界センサモジュール
3. 学会等名 電気学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Yabukami, H. Onodera, Y. Sato, K. Miyauchi, G. Endo, M. Fukuya, H. Kanetaka, Y. Miura, H. Takahashi, T. Kodama
2. 発表標題 Evaluation of bacteria using switching magnetic field.
3. 学会等名 2019 Joint MMM-Intermag Conference
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藪上 信
2. 発表標題 磁界センサに関する動向と今後
3. 学会等名 2019 Institute of Electrical and Electronics Engineers (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋隼之介, トンタットロイ, 小野寺英彦, 沖田和彦, 藪上信, 横田琴音, 古谷真衣子, 金高弘恭, 三浦由則, 高橋英樹
2. 発表標題 スイッチ磁界に対する磁気ビーズの応答性を利用した細菌検出
3. 学会等名 日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Yabukami, H. Uetake, T. Ozawa
2. 発表標題 High Frequency Carrier Type Thin Film Sensor
3. 学会等名 Proceedings of The Biomagnetic Sendai 2017 Satellite symposium (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Yabukami, H. Uetake, T. Ozawa
2. 発表標題 High-Frequency Carrier-Type Thin Film Sensor
3. 学会等名 Biomagnetic Sendai 2017 Satellite symposium (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 数上 信, 植竹宏明, 小野寺英彦, 小林伸聖, 早坂淳一, 荒井賢一
2. 発表標題 SmCo 薄膜を用いたミアンダコプレーナ線路型薄膜センサ
3. 学会等名 日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Yabukami
2. 発表標題 High frequency magnetic measurement and magnetic field sensor.
3. 学会等名 Indian Institute of Science (IISc) Seminar (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 数上 信
2. 発表標題 高周波駆動薄膜磁界センサの開発と生体磁気計測への応用
3. 学会等名 第7回 磁気センサの高機能化と応用調査専門委員会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 数上 信
2. 発表標題 高周波磁気計測、磁気センサ
3. 学会等名 名古屋大学 大学院電子情報システム特別講義
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 数上 信
2. 発表標題 磁気センサ、生体計測の基礎
3. 学会等名 仙台高等専門学校 電気システム工学科5年特別講義
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 森谷健太, 植竹宏明, 冨並 剛, 数上 信
2. 発表標題 バイアス通電によるミアンダコプレーナ線路型薄膜センサの開発
3. 学会等名 平成28年度電気関係学会東北支部連合会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 R. Sai, M. Yamaguchi, S. Takeda, S. Yabukami, S. Shivashankar
2. 発表標題 Co- and Ti-substituted M-type hexaferrites for high frequency applications
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 森 修, 藪上 信, 遠藤 恭, 島田 寛, 内海良一
2. 発表標題 磁性薄膜の応力と強磁性共鳴の評価
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 住田千尋, 菊池弘昭, 植竹宏明, 藪上 信, 杵 修一郎, 石山和志
2. 発表標題 磁壁共鳴を利用したMHz帯域での直接通電型薄膜磁気インピーダンスセンサの可能性
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 植竹宏明, 森谷健太, 冨並 剛, 藪上 信
2. 発表標題 バイアス通電によるミアンダコプレーナ線路型薄膜センサ素子
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 大崎祐太郎, 杵 修一郎, 藪上 信, 金高弘恭, 石山和志
2. 発表標題 複数の励磁コイルの適用による位置検出システムの検出性能改善
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 植竹宏明, 森谷健太, 冨並 剛, 藪上 信
2. 発表標題 バイアス通電によるミアンダコプレーナ線路薄膜センサの開発
3. 学会等名 マグネティックス研究会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 住田千尋, 菊池弘昭, 植竹宏明, 藪上 信, 杵 修一郎, 石山和志
2. 発表標題 低周波領域における薄膜MI素子の磁壁移動に伴う特性変化とその解析
3. 学会等名 マグネティックス研究会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 藪上 信, 小澤哲也, 植竹宏明, 内海 良一, 島田 寛
2. 発表標題 マイクロストリップ型プローブによる薄膜透磁率評価
3. 学会等名 平成28年度 スピニクス特別研究会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 大崎祐太郎, 杵 修一郎, 藪上 信, 金高弘恭, 石山和志
2. 発表標題 LC共振型磁気マーカを用いたワイヤレス位置検出システムの励磁方法に関する検討
3. 学会等名 マグネティックス研究会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 森 修, 藪上 信, 遠藤 恭, 島田 寛, 内海良一
2. 発表標題 磁性薄膜の強磁性共鳴と応力の評価
3. 学会等名 マグネティックス研究会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 サイラナジツト, 佐藤光晴, 山口正洋, 武田 茂, 藪上 信
2. 発表標題 BaおよびSr系六方晶フェライト材料の高周波特性
3. 学会等名 マグネティックス研究会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 藪上 信, 植竹宏明, 森谷健太, 富並 剛, 小野寺英彦
2. 発表標題 バイアス通電によるミアンダコプレーナ薄膜磁界センサ
3. 学会等名 平成29年電気学会全国大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 池田賢司, 小林伸聖, 藪上 信, 荒井賢一
2. 発表標題 FeCo-MgFナノグラニューラ-薄膜の高周波誘電特性
3. 学会等名 平成29年電気学会全国大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 遠藤恭, 藪上 信, 森 修, 内海良一, 島田 寛
2. 発表標題 高周波伝送線路型プローブによる磁性薄膜の磁気ひずみ計測法の開発
3. 学会等名 平成29年電気学会全国大会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 日本磁気学会	4. 発行年 2016年
2. 出版社 丸善	5. 総ページ数 888
3. 書名 磁気便覧	

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 磁界センサとその製造方法	発明者 藪上信, 植竹宏明	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、6482001	取得年 2019年	国内・外国の別 国内

〔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
研究 分 担 者	小林 伸聖 (Kobayashi Nobukiyo) (70205475)	公益財団法人電磁材料研究所・その他部局等・研究員(移行) (71301)	

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