

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02212

研究課題名（和文）革新的な高機能・高信頼ダイヤモンド MEMSの基盤構築と磁気センサの応用

研究課題名（英文）High-performance and high-reliability diamond MEMS: fundamental and magnetic sensing application

研究代表者

廖 梅勇 (LIAO, Meiyong)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・主席研究員

研究者番号：70528950

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：既存の高温磁気センサはサイズや電力消費が大きい、もしくは感度が低く高温で動作が不安定になるなどの欠点があります。本研究では、ダイヤモンドを使って、500℃の高温でも低消費電力で安定に動作する、高感度なMEMS磁気センサの開発に成功しました。さらに、ダイヤモンドが高温でも安定して駆動する仕組みを理論的に明らかにすることで、既存の高温磁気センサの欠点を克服しました。

研究成果の学術的意義や社会的意義  
本成果は、内燃機関、石油、鉱物探索、原子炉の材質劣化診断、宇宙利用など過酷な環境下における磁気センシングに応用されることが期待できます。

研究成果の概要（英文）：All the present magnetic sensors have each own drawback, such as high cost, low-temperature requirement, and complex infrastructure for SQUID, low sensitivity for Hall sensor, and high volume and power consumption for fluxgate sensor. In particular, magnetic sensing with preserved performance at high temperatures over 500℃ has been difficult for these sensors. The present magnetic sensors are suffered from low sensitivity and poor reliability issues due to the lack of proper device concept compatible with materials tailoring. In this project, we combined the robust single-crystal diamond (SCD) MEMS with a multifunctional magnetostrictive FeGa film and demonstrated the integrated on-chip resonator-type MEMS magnetic sensor. The MEMS magnetic sensor shows a high sensitivity of 9.45 nT/Hz<sup>1/2</sup>, stable up to 300℃. The work paves the way for producing magnetic sensor to overcome the weakness of the current magnetic sensors in sensitivity, energy consumption, and reliability.

研究分野：電気・電子機器

キーワード：ダイヤモンド MEMS 磁気センサー

## 1. 研究開始当初の背景

多くの応用分野において、例えば航空機や自動車エンジンの回転数やスピードセンサ、石油探索における地磁気の変化や磁性鉱物の探索のほか、超スマート社会 (Society 5.0) の実現のために高温環境下で安定に動作する磁気センサが求められている。しかし、既存の磁気センサは 300 °C 以上で性能は劣化する。広く使われている磁気抵抗センサは高温での動作が可能ですが、界面拡散によりセンシング性能が著しく低下する。もう一つの高温磁気センサであるホールセンサーは感度が低く、高温でのキャリア移動度の低下して、安定した動作ができない。したがって、500 °C 以上の高温環境で高感度な熱的に安定した磁気センサはまだ課題となっている。マイクロエレクトロメカニカルシステム (MEMS) 技術に基づく磁気センサは、従来のセンサに比べて小型化、バッチ製造、低消費電力、高感度、CMOS と集積化できる優れた利点を持っている。しかし、これまでに MEMS は、主にシリコンや金属材料を用いて作製されてきたが、作製したデバイスは、機械的、電気的、化学的および熱的な安定性が悪く、さらなる高性能化および高信頼性化は困難である。

単結晶ダイヤモンド (SCD) は 5.5 eV の広いバンドギャップを有し、物質中で最高の機械性能、最大の熱伝導率・耐熱性等の優れた物性を持つため、さらに、最低の機械損失を持つことで、究極の MEMS 材料として注目され、通常環境から極限環境 (例えば 300 °C 以上の高温) まで広く利用が期待されている。ダイヤモンド MEMS 磁気センサは、超伝導量子干渉装置 (SQUID) の低温要件、磁気コイルやフラックスゲートセンサーの大体積、巨大磁気抵抗 (GMR) センサの低精度などの固有の欠点を克服することができる。

## 2. 研究の目的

本研究では、500 °C 高温まで動作可能な高信頼性・高感度を持つ集積化磁気センサの開発を目指す。この目的を達成するために、単結晶ダイヤモンド MEMS 共振子 (カンチレバービーム) の上に磁歪材料 FeGa 薄膜を堆積する。磁気材料 FeGa 膜とダイヤモンドの間に Ti、Ti/WC、WC などの異なるバッファ層を使用すること、およびダイヤモンドカンチレバーの寸法を変わり、MEMS 磁気センシング特性を変調して、感度と熱安定性を最適化することを狙う。

## 3. 研究の方法

ダイヤモンド MEMS 機械共振子はイオンビーム注入補助スマートカット技術で作製した。具体的に、単結晶ダイヤモンド基板に高エネルギーイオン (カーボン、180keV、ドーズ量  $10^{16} \text{cm}^{-2}$ ) を注入することによって、局所的にダイヤモンドをアモルファスカーボンに相変態させた犠牲層を形成した後、その後フォトリソグラフィプロセスを用いて、またグラファイト犠牲層を溶液エッチング除去することによって、単結晶ダイヤモンド MEMS 機械共振子を作製した。続いて、単結晶ダイヤモンド MEMS 機械共振子の上に、超高真空スパッタ装置により  $\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}$  膜 (80 nm) を成膜した。磁気センサの熱安定性を向上させるために、ダイヤモンドと FeGaB の間に Ti 層が挿入された。作製方法についての概略を図 1 (a) に示す。図 1 (b) には、FeGa を堆積した後のダイヤモンドカンチレバー MEMS 磁気センサアレイを示す。カンチレバーのプロファイルを見ると、FeGa 薄膜がダイヤモンドカンチレバーに圧縮応力を誘発することが分かる。

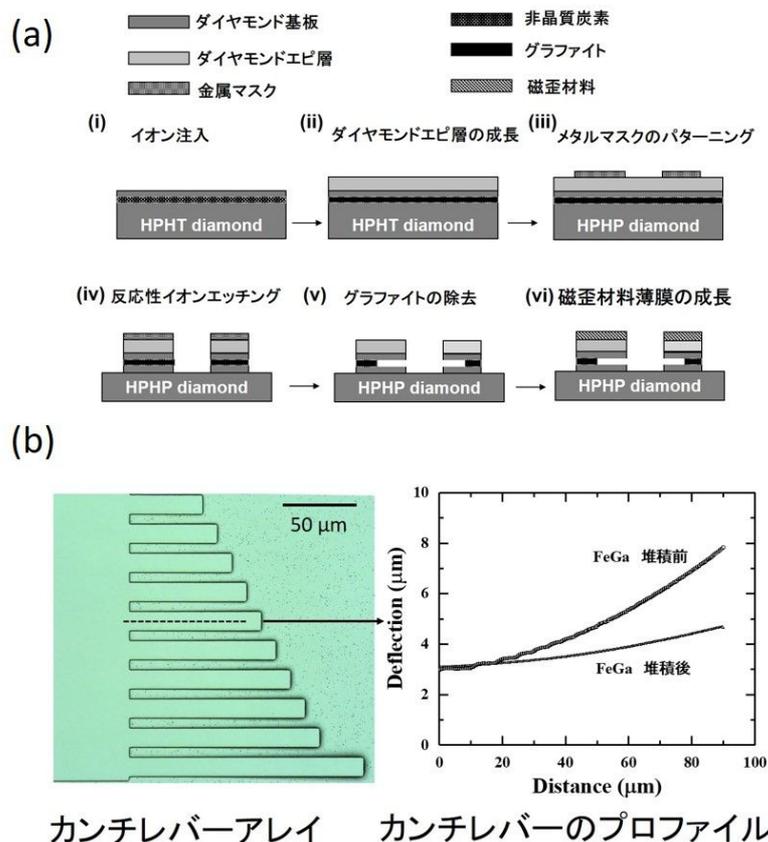


図1 (a) 単結晶ダイヤモンドMEMS 磁気センサの作製 (b) 単結晶ダイヤモンド磁気センサカンチレバーアレイの光学顕微鏡写真とカンチレバーのプロファイル

磁気センサの熱安定性を向上させるために、ダイヤモンドとFeGaBの間にTi、Ti/WC或いはWCバッファ層が挿入された。FeGa堆積では、RFパワーは100Wで固定され、Arの圧力は1Paで、基板温度が室温であった。

FeGa 磁気薄膜またはバッファ層の表面形態と相構造は、原子間力顕微鏡 (AFM、Bruker) および X 線回折 (XRD、Cu K 線) システムによって調査された。透過型電子顕微鏡 (TEM) 観察のための試料を作成するために、フォーカスイオンビーム (FIB) が使用された (JEOL、JEM-ARM200F、200 kV)。ダイヤモンドカンチレバーの共振周波数を測定するために、レーザー Doppler 光学読み取りシステム (LV 1710) 装置を使用した。測定は、真空プローブステーション内で室温から 773 K まで、圧力が  $10^{-3}$  Pa 未満の環境で行った。FeGa 薄膜およびバッファ層を有する使用されたマルチレイヤー構成のダイヤモンド MEMS の磁気センシング性能は、加熱と冷却を繰り返して、異なる磁場への共振周波数の変化を測定した。外部磁場はダイヤモンドカンチレバーの表面と平行した。

#### 4. 研究成果

ダイヤモンドMEMS磁気センサの動作原理は、簡単に言えば、ダイヤモンドMEMS共振子に堆積された磁歪材料FeGaは、外部磁場変化により、ダイヤモンドカンチレバーは応力を受ける。この応力は、MEMS共振子の共振周波数のシフトを誘発する。応力が圧縮性である場合には、共振周波数は低下し、引張りである場合、共振周波数は増加する。磁気感度は、ダイヤモンド機械共振子の特性、例えば、質量、共振周波数や品質因子など、磁性薄膜の磁歪特性、およびダイヤモンド共振子と磁性薄膜の間のひずみ結合によって決まる。したがって、MEMS磁気セ

ンシング特性は、例えば、ノイズレベル、ダイナミックレンジ、空間分解能などをダイヤモンド共振子の形状と磁性材料とダイヤモンドの界面構造が細く変調することができる。

FeGa 磁気薄膜の微細構造に対するバッファ層の影響を調査するには、FeGa/SCD、FeGa/Ti/SCD、FeGa/WC/SCD、および FeGa/WC/Ti/SCD の構造が作製された。上記のマルチレイヤー構造の FeGa 磁気薄膜は、平滑な表面を有し、粗さのルートミーンスクエア (RMS) は 1.2 nm 以内であった。Ti バッファ層がない SCD 基板および Ti バッファ層を挿入した SCD 基板上に堆積された FeGa 薄膜は、ストリップと島を形成する結晶粒を持つ密な構造を持つ。WC バッファ層上の FeGa 膜は、単純にストリップ状で RMS が高い。

さまざまなマルチレイヤー構造上で成長した FeGa 薄膜の XRD パターンに基づいて、主に A2 および D03 の BCC 相である。FeGa/SCD および FeGa/Ti/SCD 構造では、FeGa 薄膜は主に (220) 方位の BCC 相を持っている。Ti バッファ層は FeGa 薄膜の結晶性を向上させる。一方、WC 膜を含むマルチレイヤー構造では、FeGa 薄膜は (200) 方位の BCC 相を持つ。バッファ層の影響を調べるために、FeGa 薄膜の堆積前に Ti、WC、および WC/Ti 膜の XRD パターンも測定した。結果として、SCD 上の Ti 膜は (002) 方位の六方最密充填 (HCP) 相を持つことが明らかになった。SCD または Ti/SCD 上の WC 膜の主要な相構造は (200) 方位の面心立方 (FCC) 相である。

異なるバッファ層を使用した本研究評価した FeGa 薄膜は、全部で同じ SCD カンチレバーの上に堆積した。ダイヤモンドカンチレバーの共振周波数は、以下の通り、Euler-Berboulli 梁理論によって説明できる。

$$f = 0.162 \frac{t}{L^2} \sqrt{\frac{E_{eff}}{\rho_{eff}}} \quad (1)$$

$E_{eff}$  は効果的なヤング率、 $\rho_{eff}$  はダイヤモンドの質量密度である。t と L は、カンチレバーの厚さと長さである。

共振周波数とカンチレバーの関係は、式 1 の法則に従っている。FeGa、Ti、および WC バッファ層の堆積後、ダイヤモンドカンチレバーの共振周波数は減少する。マルチレイヤーの堆積に伴い、SCD カンチレバーの品質因子 (Q 値) も減少した。異なるマルチレイヤー構造を持つ SCD カンチレバーの Q 値は 2000~2500 であった。

バッファ層の有無にかかわらず、FeGa/SCD カンチレバーの多層構造を利用して、MEMS 磁気センサを作成した。磁気センシング原理は、外部磁場を印加することにより、磁歪材料のヤング率の変化 (E) 効果に基づいている。図 2 は、加熱プロセス中のさまざまな測定温度で磁場 ( $H = 2.82$  mT) を加えない場合と加えた場合の SCD MEMS 磁気センサの共振周波数スペクトルを示す。磁場ない場合、SCD MEMS 磁気センサの共振周波数は、温度の上昇に伴って低周波数にシフトすることがわかる。これはダイヤモンドのヤング率の減少に起因すると考えられる。さらに、SCD MEMS 磁気センサの共鳴スペクトルは、構造が異なるとさまざまなシフトを示す。特に、FeGa/WC/SCD カンチレバーの共振周波数は磁場を印加すると高周波にシフトし、磁場によって誘起される FeGa 膜内の引張応力の存在が明らかになる。対照的に、他の多層膜の FeGa 膜には、磁場を印加するとき、圧縮応力が生成された。したがって、WC 中間層は FeGa 膜の配向を調整するだけでなく、磁場下での FeGa 膜の応力状態も変化した。FeGa/Ti/SCD 構造の最高動作温度は 773 K で、FeGa/WC/Ti/SCD 構造は、673 K で達成される 75.4 Hz/mT の最高の磁気感度を実現した。

最終的に、オンチップ全電気集積化ダイヤモンド MEMS 磁気センサを作製した。磁歪特性

を持つ FeGa 膜は、駆動電極、磁場のセンシングヘッド、および電気読み取りユニットとして機能化する。ダイヤモンド MEMS 磁気トランスデューサは、773 K までの高温動作を示し、573K で 3.2 Hz/mT の高感度と 9.45 nT/Hz<sup>1/2</sup> の低ノイズレベルを実現した。共振周波数の最小変動は室温で  $1.9 \times 10^{-6}$ 、573K で  $2.3 \times 10^{-6}$  に達した。

電氣的に信号の並列読み出しを実現するためにダイヤモンド MEMS 磁気トランスデューサアレイも開発された。磁気センシング性能は、ナノスケールのサイズ設計、高品質因子、および大きな磁歪薄膜によってさらに向上できる。本研究は、ダイヤモンド MEMS 磁気トランスデューサとエレクトロニクスの集積化を実証することに成功した。将来、高感度、信頼性、変調可能な空間分解能を備えた磁気イメージセンサの開発が進めている。

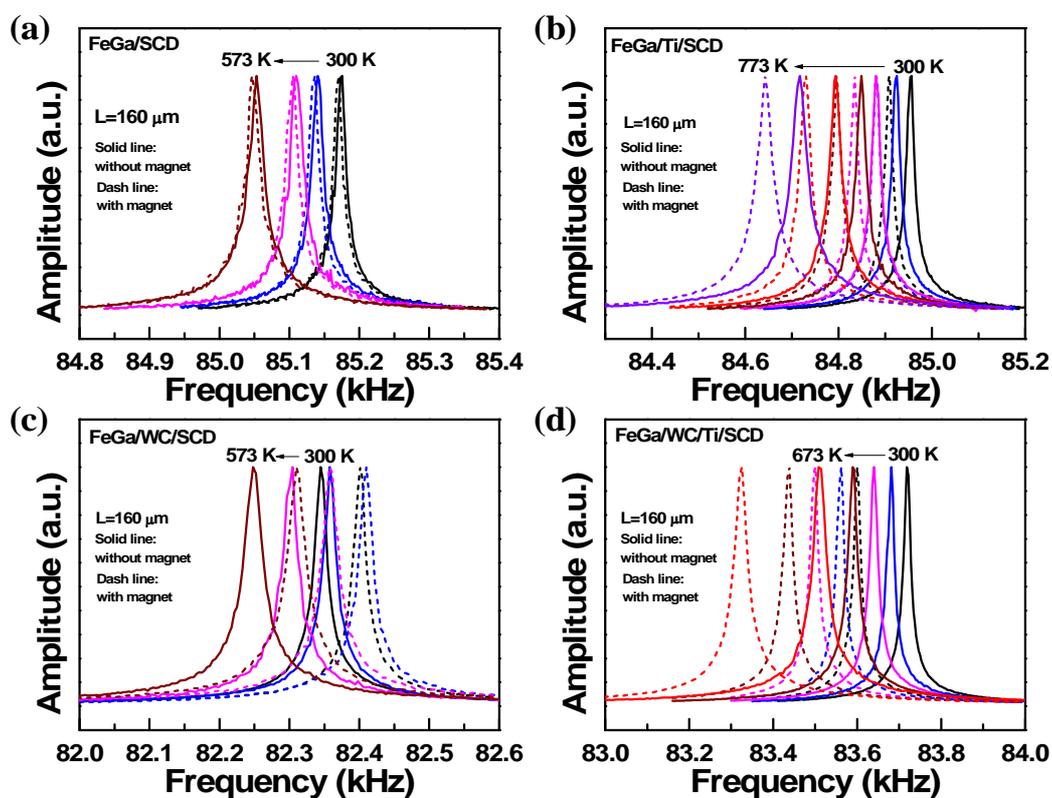


図2 異なる温度で、外部磁場は 2.82 mT の時、さまざまな多層膜を備えた磁気センサー (L=160 μm) の共振周波数シフト。実線と破線は、磁場なしと磁場ありの共振スペクトルを示している。(a) FeGa/SCD、300 K~573 K。(b) FeGa/Ti/SCD、300 K~773 K。(c) FeGa/WC/SCD、300 K~573 K。(d) FeGa/WC/Ti/SCD、300 K~673 K。

要約すると、FeGa/SCD、FeGa/Ti/SCD、FeGa/WC/SCD、および FeGa/Ti/WC/SCD のさまざまな多層構造を持つ磁気センサを研究開発した。ダイヤモンド MEMS 磁気センサは、773K 高温まででも  $\sim \text{nT/Hz}^{0.5}$  の感度を有し、高感度と高信頼性を同時に満足した。本成果は、内燃機関、石油、鉱物探索、原子炉の材質劣化診断、宇宙利用など過酷な環境下における磁気センシングに応用されることが期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計23件（うち査読付論文 21件 / うち国際共著 14件 / うちオープンアクセス 2件）

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Zhang Zilong, Zhao Wen, Chen Guo, Toda Masaya, Koizumi Satoshi, Koide Yasuo, Liao Meiyong  | 4. 巻<br>33                    |
| 2. 論文標題<br>On chip Diamond MEMS Magnetic Sensing through Multifunctionalized Magnetostrictive Thin Film                                    | 5. 発行年<br>2023年               |
| 3. 雑誌名<br>Advanced Functional Materials  | 6. 最初と最後の頁<br>2300805         |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1002/adfm.202300805   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |
| 1. 著者名<br>Shen Xiulin, Lv Zhenfei, Ichikawa Kimiyoshi, Sun Huanying, Sang Liwen, Huang Zhaohui, Koide Yasuo, Koizumi Satoshi, Liao Meiyong | 4. 巻<br>234                   |
| 2. 論文標題<br>Stress effect on the resonance properties of single-crystal diamond cantilever resonators for microscopy applications           | 5. 発行年<br>2022年               |
| 3. 雑誌名<br>Ultramicroscopy  | 6. 最初と最後の頁<br>113464 ~ 113464 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.ultramic.2022.113464   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する                  |
| 1. 著者名<br>Sun Huanying, Sang Liwen, Shen Xiulin, Yang Xuelin, Li Tiefu, You J. Q., Shen Bo, Liao Meiyong                                   | 4. 巻<br>131                   |
| 2. 論文標題<br>Elastic strain engineered nanomechanical GaN resonators with thermoelastic dissipation dilution up to 600?K                     | 5. 発行年<br>2022年               |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Applied Physics   | 6. 最初と最後の頁<br>054502 ~ 054502 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1063/5.0080227  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する                  |
| 1. 著者名<br>Chen Yinling, Sang Liwen, Koizumi Satoshi, Koide Yasuo, Liu Xiaoxi, Liao Meiyong   | 4. 巻<br>129                   |
| 2. 論文標題<br>Effect of gas pressure on the quality-factor of single-crystal diamond micro cantilevers  | 5. 発行年<br>2022年               |
| 3. 雑誌名<br>Diamond and Related Materials  | 6. 最初と最後の頁<br>109340 ~ 109340 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.diamond.2022.109340  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|   |                         |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Zhang Zilong, Sang Liwen, Huang Jian, Wang Linjun, Koide Yasuo, Koizumi Satoshi, Liao Meiyong   | 4. 巻<br>200             |
| 2. 論文標題<br>Enhancement of magnetic sensing performance of diamond resonators coupling with magnetic-strictive FeGa films by various interlayers | 5. 発行年<br>2022年         |
| 3. 雑誌名<br>Carbon  | 6. 最初と最後の頁<br>401 ~ 409 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.carbon.2022.08.086  | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する            |

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Wu Haihua, Zhang Zilong, Sang Liwen, Li Tiefu, You Jianqiang, Lu Yingjie, Koide Yasuo, Liao Meiyong | 4. 巻<br>103                   |
| 2. 論文標題<br>Electrical readout/characterization of single crystal diamond (SCD) cantilever resonators          | 5. 発行年<br>2020年               |
| 3. 雑誌名<br>Diamond and Related Materials   | 6. 最初と最後の頁<br>107711 ~ 107711 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.diamond.2020.107711   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する                  |

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Shen Xiulin, Wu Kongping, Sun Huanying, Sang Liwen, Huang Zhaohui, Imura Masataka, Koide Yasuo, Koizumi Satoshi, Liao Meiyong | 4. 巻<br>116                   |
| 2. 論文標題<br>Temperature dependence of Young's modulus of single-crystal diamond determined by dynamic resonance                          | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Diamond and Related Materials   | 6. 最初と最後の頁<br>108403 ~ 108403 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1063/5.0058646   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Sun Huanying, Shen Xiulin, Sang Liwen, Imura Masataka, Koide Yasuo, You Jianqiang, Li Tie-Fu, Koizumi Satoshi, Liao Meiyong | 4. 巻<br>14                    |
| 2. 論文標題<br>Thermal mismatch induced stress characterization by dynamic resonance based on diamond MEMS                                | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Applied Physics Express   | 6. 最初と最後の頁<br>045501 ~ 045501 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.diamond.2021.108403   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する                  |

|   |                             |
|---|-----------------------------|
| 1. 著者名<br>Zhang Guo-Qiang, Chen Zhen, Xu Da, Shammah Nathan, Liao Meiyong, Li Tie-Fu, Tong Limin, Zhu Shi-Yao, Nori Franco, You J. Q. | 4. 巻<br>2                   |
| 2. 論文標題<br>Exceptional Point and Cross-Relaxation Effect in a Hybrid Quantum System   | 5. 発行年<br>2021年             |
| 3. 雑誌名<br>PRX Quantum   | 6. 最初と最後の頁<br>020307-020307 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.35848/1882-0786/abe7b0   | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する                |

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Zhang Zilong, Sang Liwen, Huang Jian, Wang Linjun, Koizumi Satoshi, Liao Meiyong     | 4. 巻<br>858                   |
| 2. 論文標題<br>Tailoring the magnetic properties of galphenol film grown on single-crystal diamond | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Alloys and Compounds  | 6. 最初と最後の頁<br>157683 ~ 157683 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/prxquantum.2.020307  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Liao Meiyong   | 4. 巻<br>1             |
| 2. 論文標題<br>Progress in semiconductor diamond photodetectors and MEMS sensors | 5. 発行年<br>2021年       |
| 3. 雑誌名<br>Functional Diamond   | 6. 最初と最後の頁<br>29 ~ 46 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.jallcom.2020.157683                    | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Sun Huanying, Shen Xiulin, Sang Liwen, Imura Masataka, Koide Yasuo, You Jiangqiang, Li Tie-Fu, Koizumi Satoshi, Liao Meiyong | 4. 巻<br>14                    |
| 2. 論文標題<br>Thermal mismatch induced stress characterization by dynamic resonance based on diamond MEMS                                 | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Applied Physics Express  | 6. 最初と最後の頁<br>045501 ~ 045501 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1080/26941112.2021.1877019  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する                  |

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Zhang Zilong, Sang Liwen, Huang Jian, Wang Linjun, Koizumi Satoshi, Liao Meiyong    | 4. 巻<br>858                   |
| 2. 論文標題<br>Tailoring the magnetic properties of galfenol film grown on single-crystal diamond | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Alloys and Compounds   | 6. 最初と最後の頁<br>157683 ~ 157683 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.35848/1882-0786/abe7b0   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する                  |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Liao Meiyong   | 4. 巻<br>1             |
| 2. 論文標題<br>Progress in semiconductor diamond photodetectors and MEMS sensors | 5. 発行年<br>2021年       |
| 3. 雑誌名<br>Functional Diamond   | 6. 最初と最後の頁<br>29 ~ 46 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.jallcom.2020.157683                    | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

|  |                             |
|--|-----------------------------|
| 1. 著者名<br>Zhang Zilong, Wu Haihua, Sang Liwen, Takahashi Yukiko, Huang Jian, Wang Linjun, Toda Masaya, Akita Indianto Mohammad, Koide Yasuo, Koizumi Satoshi, Liao Meiyong | 4. 巻<br>12                  |
| 2. 論文標題<br>Enhancing Delta E Effect at High Temperatures of Galfenol/Ti/Single-Crystal Diamond Resonators for Magnetic Sensing   | 5. 発行年<br>2020年             |
| 3. 雑誌名<br>ACS Applied Materials & Interfaces   | 6. 最初と最後の頁<br>23155 ~ 23164 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1021/acsami.0c06593   | 査読の有無<br>無                  |
| オープンアクセス<br>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<br>-                   |

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Zhang Zilong, Sang Liwen, Huang Jian, Chen Waiyan, Wang Linjun, Takahashi Yukiko, Mitani Seiji, Koide Yasuo, Koizumi Satoshi, Liao Meiyong | 4. 巻<br>170             |
| 2. 論文標題<br>Enhanced magnetic sensing performance of diamond MEMS magnetic sensor with boron-doped FeGa film  | 5. 発行年<br>2020年         |
| 3. 雑誌名<br>Carbon   | 6. 最初と最後の頁<br>294 ~ 301 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1080/26941112.2021.1877019  | 査読の有無<br>無              |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する            |

|   |                      |
|---|----------------------|
| 1. 著者名<br>Sun Huanying, Sang Liwen, Wu Haihua, Zhang Zilong, Teraji Tokuyuki, Li Tie-Fu, You Jiangqiang, Toda Masaya, Koizumi Satoshi, Liao Meiyong | 4. 巻<br>125          |
| 2. 論文標題<br>Effect of Deep-Defects Excitation on Mechanical Energy Dissipation of Single-Crystal Diamond   | 5. 発行年<br>2020年      |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review Letters   | 6. 最初と最後の頁<br>206802 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.carbon.2020.08.049  | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する         |

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Wu Haihua, Zhang Zilong, Sang Liwen, Li Tiefert, You Jianqiang, Imura Masataka, Koide Yasuo, Liao Meiyong     | 4. 巻<br>170                   |
| 2. 論文標題<br>Precise characterization of atomic-scale corrosion of single crystal diamond in H2 plasma based on MEMS/NEMS | 5. 発行年<br>2020年               |
| 3. 雑誌名<br>Corrosion Science   | 6. 最初と最後の頁<br>108651 ~ 108651 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/physrevlett.125.206802  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する                  |

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Zhang Zilong, Wu Yuanzhao, Sang Liwen, Wu Haihua, Huang Jian, Wang Linjun, Takahashi Yukiko, Li Runwei, Koizumi Satoshi, Toda Masaya, Akita Indianto Mohammad, Koide Yasuo, Liao Meiyong | 4. 巻<br>8               |
| 2. 論文標題<br>Coupling of magneto-strictive FeGa film with single-crystal diamond MEMS resonator for high-reliability magnetic sensing at high temperatures   | 5. 発行年<br>2020年         |
| 3. 雑誌名<br>Materials Research Letters   | 6. 最初と最後の頁<br>180 ~ 186 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1021/acscami.0c06593  | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する            |

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Wu Haihua, Zhang Zilong, Sang Liwen, Li Tiefert, You Jianqiang, Lu Yingjie, Koide Yasuo, Liao Meiyong | 4. 巻<br>103                   |
| 2. 論文標題<br>Electrical readout/characterization of single crystal diamond (SCD) cantilever resonators            | 5. 発行年<br>2020年               |
| 3. 雑誌名<br>Diamond and Related Materials   | 6. 最初と最後の頁<br>107711 ~ 107711 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1080/21663831.2020.1734680   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する                  |

|   |                         |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Zhang Zilong, Sang Liwen, Huang Jian, Wang Linjun, Koide Yasuo, Koizumi Satoshi, Liao Meiyong   | 4. 巻<br>200             |
| 2. 論文標題<br>Enhancement of magnetic sensing performance of diamond resonators coupling with magnetic-strictive FeGa films by various interlayers | 5. 発行年<br>2022年         |
| 3. 雑誌名<br>Carbon  | 6. 最初と最後の頁<br>401 ~ 409 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.diamond.2020.107711   | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する            |

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 8件)

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Guo Chen, Zilong Zhang, Liwen Sang, Yasuo Koide, Satoshi Koizumi, Meiyong Liao   |
| 2. 発表標題<br>Effect of Ultra-High Vacuum Annealing and Hydrogen Plasma Treatment on the Resonance Properties of Single-Crystal Diamond MEMS Cantilevers |
| 3. 学会等名<br>2023年第70回応用物理学会春季学術講演会   |
| 4. 発表年<br>2022年 ~ 2023年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Zilong Zhang, Guo Chen, Liwen Sang, Yasuo Koide, Satoshi Koizumi and Meiyong Liao |
| 2. 発表標題<br>High-temperature Diamond MEMS magnetic sensor with on-chip actuation and sensing  |
| 3. 学会等名<br>2023年第70回応用物理学会春季学術講演会  |
| 4. 発表年<br>2022年 ~ 2023年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>CHEN, Yingling, サン ファンイン, SANG, Liwen, KOIZUMI, Satoshi, KOIDE, Yasuo, Xiaoxi Liu, LIAO, Meiyong |
| 2. 発表標題<br>Efficient etching of diamond by oxygen annealing toward high-Q factor diamond MEMS resonators.   |
| 3. 学会等名<br>E-MRS Spring Meeting 2022 (招待講演) (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>CHEN, Yingling, サン フアンイン, SANG, Liwen, KOIDE, Yasuo, KOIZUMI, Satoshi, Xiaoxi Liu, LIAO, Meiyong |
| 2. 発表標題<br>Effect of pressure on quality-factor of single-crystal diamond micro cantilevers                 |
| 3. 学会等名<br>15th International Conference on New Diamond and Nano Carbons (NDNC2022) (国際学会)                  |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>ZHANG, Zilong, SANG, Liwen, KOIDE, Yasuo, KOIZUMI, Satoshi, LIAO, Meiyong                                     |
| 2. 発表標題<br>Enhancement of Magnetic Sensing Performances of Single-crystal Diamond Resonators through Various Interlayers |
| 3. 学会等名<br>15th International Conference on New Diamond and Nano Carbons 2022 (NDNC2022) (国際学会)                          |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>CHEN, Yingling, SANG, Liwen, KOIDE, Yasuo, KOIZUMI, Satoshi, 劉 小晰, LIAO, Meiyong   |
| 2. 発表標題<br>Air damping effect on the quality factor of single-crystal diamond MEMS resonators |
| 3. 学会等名<br>第83回応用物理学会秋季学術講演会  |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>LIAO, Meiyong, ZHANG, Zilong, SANG, Liwen, KOIDE, Yasuo, KOIZUMI, Satoshi. |
| 2. 発表標題<br>High-temperature Magnetic Sensor Based on Single-crystal Diamond MEMS      |
| 3. 学会等名<br>2021年第82回応用物理学会秋季学術講演会.  |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Meiyong Liao   |
| 2. 発表標題<br>Semiconductor Diamond Electronics and MEMS Sensors   |
| 3. 学会等名<br>International Conference on Advances in Functional Materials (AAAFM-UCLA International Conference) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>シェン シウリン, ICHIKAWA, Kimiyoshi, Zhaohui Huang, KOIDE, Yasuo, IMURA, Masataka, KOIZUMI, Satoshi, LIAO, Meiyong |
| 2. 発表標題<br>Three-dimensional Raman analysis of single crystal diamond cantilevers                                       |
| 3. 学会等名<br>The 14th International Conference on New Diamond and Nano Carbons (NDNC2020/2021) conference (国際学会)          |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>ZHANG, Zilong, SANG, Liwen, KOIDE, Yasuo, KOIZUMI, Satoshi, LIAO, Meiyong                |
| 2. 発表標題<br>Single-crystal Diamond MEMS Resonator for Magnetic Sensor Working up to 773 K.           |
| 3. 学会等名<br>The 14th International Conference on New Diamond and Nano Carbons (NDNC2020/2021) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Meiyong Liao                                  |
| 2. 発表標題<br>High-temperature diamond MEMS magnetic sensor |
| 3. 学会等名<br>第78回日本磁気学会 スピントロニクス専門研究会 (招待講演)               |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>サン ファンイン, サン リウエン, ウ ハイファ, 寺地 徳之 .Jianqiang You, Tiefu Li, 小泉 聡, 廖 梅勇                              |
| 2. 発表標題<br>Deep-defects excitation on energy dissipation of single crystal diamond micromechanical resonators |
| 3. 学会等名<br>The 14th International Conference on New Diamond and Nano Carbons (NDNC2020/2021) (国際学会)           |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>SANG, Liwen, サン ファンイン, Xuelin Yang, Tiefu Li, Bo Shen, LIAO, Meiyong                     |
| 2. 発表標題<br>Self-Temperature-Compensated GaN MEMS Resonators through Strain Engineering up to 600 K. |
| 3. 学会等名<br>IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM) (国際学会)                                |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Meiyong Liao  |
| 2. 発表標題<br>Diamond Electronics and MEMS  |
| 3. 学会等名<br>International Symposium on Diamond and Super Hard Materials 2020 (招待講演) |
| 4. 発表年<br>2020年  |

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

|                               |  |                      |
|-------------------------------|--|----------------------|
| 産業財産権の名称<br>磁気センサー            | 発明者<br>リャオ メイヨン/<br>ジャン ジロン/サン<br>リウエン/小出 康夫 | 権利者<br>物質・材料研究<br>機構 |
| 産業財産権の種類、番号<br>特許、2020-011503 | 出願年<br>2020年                                 | 国内・外国の別<br>国内        |

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

|                   | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                    | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                 | 備考 |
|-------------------|--|---------------------------------------|----|
| 研究<br>分<br>担<br>者 | 戸田 雅也<br><br>(Toda Masaya)<br><br>(40509890) | 東北大学・工学研究科・准教授<br><br><br><br>(11301) |    |

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 |
|---------|---------|
|         |         |