

高温ダイヤモンドMEMS 磁気センサの開発に成功

～500°Cでも高感度を維持し安定して動作 内燃機関や石油探索など過酷環境での利用に期待～

配布日時：2020年11月13日14時

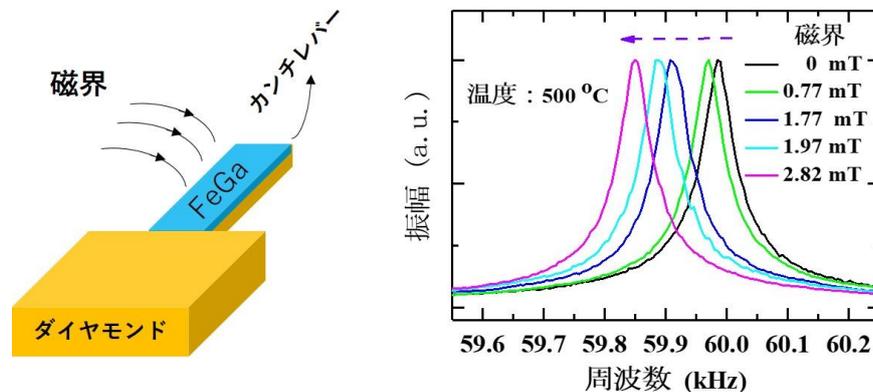
国立研究開発法人 物質・材料研究機構 (NIMS)

概要

1. NIMS は、ダイヤモンドを使って、500°C の高温でも低消費電力で安定に動作する、高感度な磁気センサの開発に成功しました。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。

2. 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ます。一方、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。そこで、 μm サイズの小型で、高感度、低消費電力、マルチセンシング機能を有する MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) ^{*1} 技術を用いた磁気センサの開発が進められています。本研究グループはこれまで、物質中で最高の硬度とヤング率を持つダイヤモンドを利用して、超高感度な MEMS センサの開発に成功しています。さらにダイヤモンドは、5.5 eV という広いバンドギャップによって、高温でも電子が励起されにくく高い感度で安定した動作が期待できることから、その理論的な裏付けと実証を行いました。

3. その結果、ダイヤモンドの欠陥エネルギー準位^{*2}が深い場合には、700°C の高温に至るまで、センサとして安定的に動作することを実験と理論で示しました。さらに高温においても外部からの磁界の影響で弾性変形できる磁歪材料^{*3}と組み合わせることで、500°C の高温でも安定して動作する MEMS 磁気センサの開発に成功しました。さらに感度も、500°C の高温でも $10\text{nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ という高い磁気感度を達成しました。



図：ダイヤモンド MEMS 磁気センサにおけるカンチレバーの構造と高温磁気センシング

4. 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。

5. 本研究は、物質・材料研究機構 機能性材料研究拠点の廖梅勇主幹研究員、NIMS 研修生 Zilong Zhang、Huanying Sun、国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 (WPI-MANA) の桑立雯独立研究者、小泉聡グループリーダー、東北大学 戸田雅也准教授によって行われました。また、研究の一部は、科研費補助金 (基盤 B 15H03999、20H02212)、TIA 連携プログラム探索推進事業「かけはし」の支援を受けて得られたものです。本研究成果は、Physical Review Letter 誌 (現地時間 2020 年 11 月 12 日公開) と、ACS Applied Materials & Interface (Vol. 12, Iss. 20) にてそれぞれ公開されました。

研究の背景

高温環境で、例えば、内燃機関、石油、鉱物探索、原子炉の材質劣化診断、宇宙利用など高信頼性を持つ磁気センサを求められています。既存の高温磁気センサは主にコイルセンサ、フラックスゲートセンサとHall センサですが、これらのセンサには様々な欠点があります。例えば、コイルセンサとフラックスゲートセンサはサイズが大きく、電力消費も大きいという欠点があり、ホール効果を利用した磁気センサは感度が低く (μT レベル)、温度依存性が大きいという欠点があります。MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) センサは、他のセンサと比較して、小型 (μm サイズ)、高感度、低消費電力、マルチセンシング機能を有するという利点があり、Society 5.0においてキーデバイスに位置づけられています。

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ましたが、作製したデバイスは、機械的、電氣的、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した。ダイヤモンドは 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、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ます。本研究グループは、2010年から単結晶ダイヤモンド基板上にダイヤモンド薄膜を成長させたダイヤモンド-オン-ダイヤモンド (全単結晶ダイヤモンド) を基本概念として、形状と寸法制御可能な単結晶ダイヤモンド MEMS 機械共振子の作製プロセスを開発しました。2014年、ダイヤモンド機械共振子の Q 値を決めるエネルギー散逸機構を解明したのち、続いて、ダイヤモンド表面を原子スケールでエッチングする技術を開発し、感度を表す品質の指標「Q 値」で 100 万以上の値を持つダイヤモンドカンチレバーの開発に成功しました。

本研究では、これらの研究成果を更に発展させ、ダイヤモンド固有の深い欠陥エネルギー準位と機械的特性の相関について検討し、MEMS 共振子としてのダイヤモンドの優位性を明確に示しました。そして、従来達成できなかった 500°C の高温でも高信頼性、低消費電力、高空間分解能 (μm) を持つ MEMS 磁気センサの開発に成功しました。

研究内容と成果

本研究で、ダイヤモンド深部欠陥の影響を調べたところ、ダイヤモンド MEMS は少なくとも 700°C で高い安定性を持っていることがわかりました。さらに、ダイヤモンド固有の深い欠陥エネルギー準位と機械的特性の相関について検討し、MEMS 共振子としてのダイヤモンドの優位性を明確に示しました。これらの成果を踏まえて、高いキュリー温度 ($>600^\circ\text{C}$) を持つ磁歪材料 $\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}$ 膜とダイヤモンドの接合形成により、高温でも動作できるダイヤモンド MEMS 磁気センサを開発しました。

図 1 はダイヤモンド MEMS 磁気センサの動作原理を示しています。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ます。この応力は、MEMS 共振子の共振周波数のシフトを誘発します。応力が圧縮性である場合、共振周波数は低下し、引張りである場合、共振周波数は増加します。FeGa / Ti / ダイヤモンドカンチレバーの磁気感知動作を室温から 500°C まで、外部磁場の変化により測定しました。図 2 に示すように、室温から 500°C までで、外部磁場を印加すると、共振周波数が低下します。磁場が高いほど、共振周波数のシフトは大きくなります。ダイヤモンド MEMS 磁気センサの感度 (Hz/mT) はカンチレバーの形状によって異なり、低い磁場範囲 ($<5\text{mT}$) では $18\text{--}36\text{Hz} / \text{mT}$ です。測定温度が上昇すると、磁気感度は増えていることが観察され、 500°C で 約 $75\text{Hz} / \text{mT}$ に達しました。磁気感度は温度によって可逆的であることがわかりました。

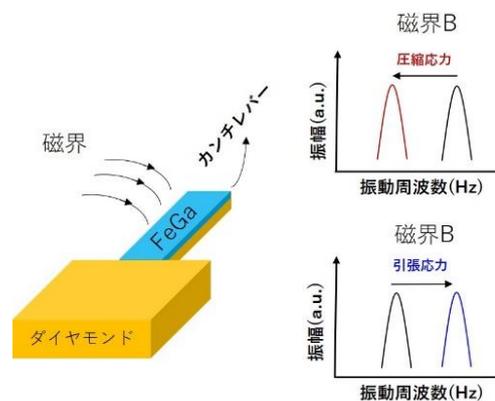


図1. ダイヤモンドMEMS磁気センサの動作原理

今後の展開

本研究では、ダイヤモンドの機械的散逸に対する深い欠陥の影響の解明に基づいて、既存の磁気センサの欠点を克服して、従来達成できなかった 500°C の高温でも高い信頼性、低消費電力、高空間分解能 (μm) を持つ MEMS 磁気センサの開発に成功しました。本研究成果は、過酷な環境下で、例えば内燃機関、石油、鉱物探索、原子炉の材質劣化診断、宇宙利用などの磁気センシングをすることが期待されます。今後、セ

ンサの感度、信頼性、寿命、速度など機能が最適化されるよう、集積化センサチップを開発していきます。

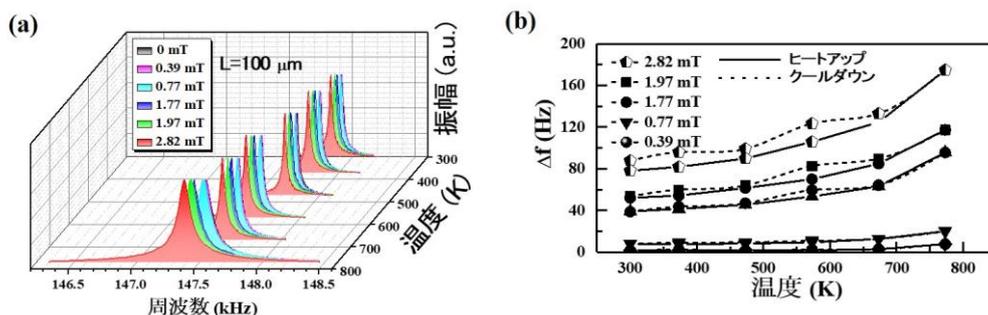


図2. (a) FeGa/Ti/diamond カンチレバーの異なる温度での外部磁場応答、(b) 共振周波数の外部磁場および温度に対する依存性

掲載論文

題目：Effect of deep-defects excitation on mechanical energy dissipation of single-crystal diamond

著者：Huanying Sun, Liwen Sang, Haihua Wu, Zilong Zhang, Tokuyuki Teraji, Tie-Fu Li, J.Q. You, Masata Toda, Satoshi Koizumi, Meiyong Liao

雑誌：Physical Review Letters

掲載日時：2020.11.12

題目：Enhancing Delta E Effect at High Temperatures of Gallenol/Ti/ Single-Crystal Diamond Resonators for Magnetic Sensing

著者：Zilong Zhang, Haihua Wu, Liwen Sang, Yukiko Takahashi, Jian Huang, Linjun Wang, Masaya Toda, Indianto Mohammad Akita, Yasuo Koide, Meiyong Liao

雑誌：ACS Applied Materials & Interfaces 12, 23155 (2020).

掲載日時：2020.04.27

用語解説

(1) MEMS

マイクロマシン (MEMSとも呼ぶ[microelectromechanical system: MEMS]) は、機械要素部品、センサーアクチュエータ、電子回路を一つの半導体基板、ガラス基板、有機材料などの上に集積化したデバイスを指す。主要部分は立体形状や可動構造を形成するための犠牲層エッチングプロセスを含む。マイクロマシンよりも小さな機械的構造を作製できるようになり、ナノマシン (NEMSとも呼ぶ[nanoelectromechanical system: NEMS]) の実現が可能となった。

(2) エネルギー準位

量子力学によれば、複数の粒子が引力によって結合している系(分子, 原子, 原子核など)のエネルギーは、一連のとびとびの値をとる。これを水準の高低になぞらえてエネルギー準位という。

(3) 磁歪材料

磁歪効果あるいは磁気ひずみは、強磁性体の特性であり、強磁性体に磁場を印加し磁化させると形状にひずみ(歪、形状変化)が現れる現象である。

磁歪材料が外部からの磁界の影響で弾性変形できる磁気材料である。

(4) MEMS 共振子

MEMS 共振子は、固有の周波数で機械的に発振する電子部品である。

(5) 品質因子 Q

Q 値は振動において、1 周期の間に系に蓄えられるエネルギーを、系から散逸するエネルギーで割ったものであり、通常、 $Q = f_0 / \Delta f$ (f_0 : 共振ピークでの共振周波数、 Δf : 共振ピークの半値幅)から決定することができる。Q 値は、レーザードップラー法により共振周波数或いはリングダウン法を測定することで評価する。Q 値は共振ピークの尖鋭度を示す共振子の性能指標の一つで、Q 値が大きいほど振動が安定する。高 Q 値は 100,000 超の値を指す。

本件に関するお問合せ先

(研究内容に関すること)

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 ワイドバンドギャップ半導体グループリーダー
小泉 聡 (こいずみ さとし) 日本語
Tel : (029)860-4310 (直通)
Fax: (029)851-4005
Email: Koizumi.Satoshi@nims.go.jp

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 ワイドバンドギャップ半導体グループ
主幹研究員
廖 梅勇 (りょう めいよん) 英語
Tel : (029)860-4508 (直通)
Fax: (029)851-4005
Email: Meiyong.Liao@nims.go.jp

(報道・広報に関すること)

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 経営企画部門 広報室
〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1
TEL: 029-859-2026, FAX: 029-859-2017
E-mail: pressrelease@ml.nims.go.jp