

**平成 30 年度 TIA 連携プログラム探索推進事業「かけはし」  
調査研究報告書(公開版)**

【研究題目】 フォトニクス技術を用いたMEMSセンサ・アクチュエータ集積化システムの調査研究

【整理番号】 TK18-005

【代表機関】 物質・材料研究機構

【調査研究代表者（氏名）】 廖 梅勇

【TIA 内連携機関：連携機関代表者】 産総研： Guangwei Cong

【TIA 外連携機関】 東北大学

【報告書作成者】 廖 梅勇           【報告書作成年月日】 2019 年 3 月 1 日

【連携推進（具体的な連携推進活動内容とその活動の効果等）】

物質・材料研究機構にある独特単結晶ダイヤモンドMEMS/NEMS 技術、と 産業技術総合研究所にある世界で有数なシリコンフォトニクス設計と加工技術を連携させ、革新的なデバイスコンセプトを提案し、高感度、高信頼性 MEMS センサの扉を開く新しい研究体制の核を作り出した。

2018年7月6日には、新デバイスコンセプト光学ダイヤモンドMEMSを創製するため、事業参加メンバーが物質材料研究機構に集まり、3時間以上議論した。現状各自実験データ及び現有実験装置の確認、MEMSセンサの研究現状、光学MEMSの学術価値、今後の展開、外部予算獲得など、連携強化へ向けた話し合いを行った。

2018年9月10日、物質・材料研究機構と産業技術総合研究所の研究代表が、再度物質材料研究機構に集まり、外部予算獲得に関する議論し、研究目標を決めた。

2018年9月12日 物質・材料研究機構の調査代表者は東北大学へ行った、外部資金の申請準備を進めた。

これらの活動を通じ2018年10月には、外部予算獲得へ向けて、科研費基盤Aの申請書を完成させることができた。

2018年7月－12月には、3報の学術論文を2018年の年内に投稿することができた。この3報論文は、すべてが受け入れられました。そのうちの2報論文をPhysical Review Materials誌（現地時間2018年9月28日公開、Editors' Suggestionに選出）と、Advanced Materials Technologiesオンライン版（現地時間2018年10月29日公開）にてそれぞれ公開されました。

2018年10月30日、TIA連携プログラム探索推進事業「かけはし」の一部支援した“超高品質因

子を持つダイヤモンドカンチレバーとそのセンサチップの開発に成功”を物質・材料研究機構のプレスリリースとして公開されました。

<https://www.nims.go.jp/news/press/2018/10/201810300.html>

2019年2月26日、物質材料研究機構の代表者 廖 梅勇を招待講演とした、新川崎・創造のもり「NANOBIIC」で「川崎市ナノ・マイクロ技術支援講座事務局」、ナノ茶論第10回セミナーで研究成果を発表した。

【調査研究内容（実験等中心に背景・課題と実行された課題解決の内容と結果）】

MEMSを幅広く応用するためには以下の二つの重要な材料学的課題あります。(1) 高Q値機械共振子の作製、及び(2) 電子回路駆動性とその機械共振子の集積化が不可欠です。Q値は機械共振子の最も基本的な性能指数であり、材料の結晶品質、表面状態及びMEMSデバイスの最終的な特性、例えば、センサの感度、スイッチの作動電圧などを決定するため、Q値の評価は重要です。一方、ほとんどMEMSの応用には、機械的共振子信号を外部電子回路によって制御と処理するために、電気的インターフェースが必要です。しかしながら、ダイヤモンドは、化学薬品に対し不溶不融であり加工が難しく、単結晶ダイヤモンドの機械共振子の作製が難しく、高Q値（高感度MEMSセンサ応用には $Q > 10000$ が必要）化は更に難しい課題でした。また、異種基板上の高品質単結晶ダイヤモンドの成長は極めて困難であること、並びに低いエネルギー散逸と高い導電性を同時に持つ高品質ダイヤモンドの成長が不可能であることから、電気信号で駆動させる単結晶ダイヤモンド MEMSは実現されていませでした。

本研究では、スマートカットと原子スケールエッチング技術を組み合わせることで、ダイヤモンドカンチレバーの結晶欠陥を取り除き、100万以上の超高Q値を持つダイヤモンド機械共振子の開発に成功しました。更に、革新的なユニバーサルオンチップセルフセンシング自励発振駆動のMEMSデバイスコンセプトを提案し、世界で初めて電気信号で駆動する単結晶ダイヤモンドMEMSチップを実証しました。開発された単結晶ダイヤモンドMEMSチップは、高感度、低い作動電圧、低いエネルギー散逸、高周波数および高温動作（600°C）の超高性能を示しました。

研究成果は高水準研究論文を掲載し、1件国内特許出願を収めることができ、日本応用物理学会、日本ニューダイヤモンドフォーラムを始め、C-MEMS、多くの国内、国際学会に発表して参りました。

研究結果は多くの新聞社、例えば、日刊工業新聞、金属時評最新ニュース、電波新聞社、科学新聞、Science Daily、Phys.org、Nanowerk、AAAS and EurekAlert (> 20) によって報告されました。

a) 論文発表状況

1. 廖 梅勇, 井村 将隆, サン リウエン, 寺地 徳之, 小泉 聡, 小出 康夫. 単結晶ダイヤモンドMEMSデバイスの研究. *NEW DIAMOND*. 34, 12 (2018).
2. H. Wu, T. Teraji, M. Imura, Y. You, Y. Koide, M. Toda, M. Liao\*, Reducing intrinsic energy dissipation in single crystal diamond-on diamond mechanical resonators, *Phys. Rev. Mater.* (Rapid Communication) 2,090601(R)(2018) (Editor's Suggestion)
3. M. Liao, L. Sang, T. Teraji, S. Koizumi, Y. Koide, Single Crystal Diamond NEMS/MEMS with Electrically Tailored Self-sensing Enhancing Actuation, *Adv. Mater. Technol.* 4, 1800325, 2019
4. Z. Zhang, H. Wu, L. Sang, M. Imura, S. Koizumi, Y. Koide, Magnetic sensor based on diamond MEMS (submitted)

b) 招待講演

1. M. Liao, Single crystal diamond MEMS: Concept, Fabrication, and Applications, Carbon MEMS 2018, June 10–12, 2018, San Diego, California, USA (招待講演).
2. M. Liao, Semiconductor diamond: photonics, electronics, and MEMS, The 9<sup>th</sup> Asia Nano conference on Nanoscience and Nanotechnology, Oct. 17-21, 2018, Qingdao, China (招待講演).
3. M. Liao, ナノ茶論第 10 回セミナー, 2019 年 2 月 26 日(火)、新川崎・創造のもり「NANO BIC」2階会議室(川崎市幸区新川崎7-7) (招待講演).

c) 特許出願

出 願 国 : 日本

発 明 名 称 : 電子素子、温度センサー、磁気センサー、振動センサーおよび加速度センサー

発明者氏名 : リャオ メイヨン/小出 康夫

出 願 人 : 国立研究開発法人物質・材料研究機構

出 願 番 号 : 2018-200133

出 願 日 : 2018-10-24

整 理 番 号 : 20180215

d) 外部資金申請・獲得状況 (公的資金、企業資金 (受託研究等))

科研費基盤 A 申請中

i) 共用施設利用回数 (施設名も)

NIMS 微細加工プラットフォーム (35回)

シリコン深掘エッチング装置、12 連電子銃型蒸着装置、原子層堆積装置、レーザー露光装置

j) その他 (例えば、プレス発表・新聞記事、受賞、試料提供など、及び特筆すべき成果)

1. NIMS プレス発表 2018. 10. 30、超高品質因子を持つダイヤモンドカンチレバーとそのセンサーチップの開発に成功
2. 日刊工業新聞、2018 年 11 月 6 日、ダイヤモンド製 MEMS 高感度 長寿命センサー実現へ
3. 金属時評最新ニュース, 2018 年 11 月 1 日、NIMS、超高品質因子を持つダイヤモンドカンチレバーとそのセンサーチップの開発に成功
4. 電波新聞社、2018 年 11 月 1 日、物質・材料研究機構: 単結晶ダイヤモンド MEMS センサーチップの開発に成功
5. 科学新聞、2018 年 11 月 9 日、ダイヤモンド MEMS センサーチップ開発・NIMS
6. Science Daily、2018 年 12 月 20 日、Development of MEMS sensor chip equipped with ultra-high quality diamond cantilevers
7. Phys.org、2018 年 12 月 20 日、Development of MEMS sensor chip equipped with ultra-high quality diamond cantilevers
8. AAAS and EurekAlert、2018 年 12 月 20 日、Development of MEMS sensor chip equipped with ultra-high quality diamond cantilevers
9. など > 20 メディア

【今後の活動予定】

以上の成果に基づいて、将来には、金属/ダイヤモンド界面の微細構造、金属のピエゾ抵抗、エネルギー散逸、信頼性 (>500°C) を評価した最適金属種類、電極構造を持つ電氣的な駆動・センシングするダイヤモンド MEMS ランスデューサーを開発する。更に、単結晶ダイヤモンド光・機械共振

器集積化構造を用いた最高変位感度  $10^{-16}$  m/(Hz)<sup>1/2</sup> を持つランスデューサを目標とする。共同研究契約を結び、MEMS と光インターフェースのフォトニクス集成デバイスを設計及び試作評価し、MEMS センサ信号の光検出と評価システム設計、測定、原理実証を行う。そして、高信頼性、高感度を持つ磁気センサの試作と真空パッケージ、性能向上を目標とする。

来年 2020 年、国際会議 Carbon MEMS が日本で開催されることの可能性を考えています。

将来、科研費以外の資金を検討します、例えば A-STEP。

以上