

レーザ加工を利用した LIG コリゲート MEMS 圧力センサ

慶應義塾大学 理工学部機械工学科

准教授 高橋 英俊

(2022 年度 奨励研究助成 (若手研究者枠) AF-2022239-C2)

キーワード：レーザ誘起グラフェン，圧力センサ，MEMS

1. 研究の目的と背景

圧力センサは医療、製造、精密産業などのさまざまな分野で不可欠であり、熱、薬品、そして負圧から高圧までの広い圧力範囲に耐える必要がある²⁾。微細加工技術の進歩により、マイクロ電気機械システム(MEMS)は圧力測定において重要な役割を果たすようになった。センサ性能を向上させるために、容量型^{3,4)}、圧電型^{5,6)}、およびピエゾ抵抗型^{7,8)}など、さまざまなタイプの圧力センサが開発されてきた。中でも、ピエゾ抵抗型圧力センサは優れた性能により広く使用されている⁹⁾。この種のセンサは一般に、薄いシリコンダイアフラムと、その端部に配置された抵抗体を感知素子として構成されている¹⁰⁾。

一方、近年、レーザ誘起グラフェン(LIG)を基盤としたセンサは、その独特な特性により大きな注目を集めている¹¹⁾。初期のグラフェン形成法では、化学気相成長(CVD)などを用い、高温下で基板上にグラフェンを成長させた後、エッチングを行っていた¹²⁾。しかし、これらの方法には、三次元形状の制御が困難であること、高温が必要であること、処理時間が長いこと、コストが高いことなどの欠点がある¹³⁾。2014 年には、ポリイミド(PI)などの市販の高分子フィルムに CO₂レーザを空気中で照射することで、多孔質のグラフェン膜(LIG)を形成できることが発見された¹⁴⁾。さらに、LIG は電気抵抗特性を持ち、ピエゾ抵抗素子としても利用可能である¹⁵⁾。この手法は化学プロセスを介さず、グラフェンの合成とパターン形成を 1 ステップで実現できるため、センサ開発に非常に適している¹⁶⁾。

LIG を圧力センサとして有効に活用するには、従来の MEMS シリコンピエゾ抵抗型圧力センサと同様に、ポリマー膜を基材とし、その端部に抵抗体を配置したダイアフラム構造を構築することが望ましい。また、3D 構造を導入することで、圧力センサの性能向上が期待できる。

有効な 3D 構造の一例が、波形(コルゲート)ダイアフラムである。コルゲート構造を持つ弾性ダイアフラムは、基本的な圧力検出素子であり、圧力による面外方向の変形およびひずみ集中を増加させる。台形断面を有するコルゲート構造は従来の MEMS シリコンプロセスでは製作が困難であるが、PI フィルム上ではレーザ加工により形成可能である。

本研究では、波形構造を有する PI 基材上に 2 個の LIG ひずみゲージを有する圧力センサを提案する。UV レーザにより波形ダイアフラムを形成し、CO₂レーザにより LIG を形成する。この 2 ステッププロセスは、2 種類のレーザ

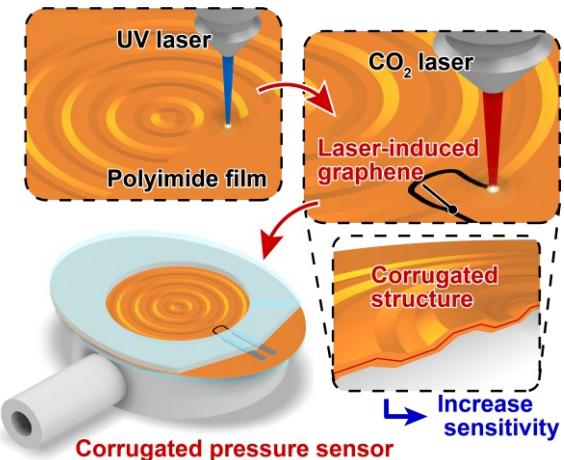


図 1 提案する LIG コリゲート圧力センサの概念図¹⁾。

のみを用いるため、センサ素子の製造を簡素化できる。なお、UV レーザでも LIG の形成は可能だが、ポリマー上では CO₂レーザの方が一般的であるため、本研究では CO₂レーザを採用した。さらに、本手法では LIG をセンサの上面と下面の両方に形成できる点が特長であり、これは従来の MEMS プロセスでは困難である。2 つの LIG ひずみゲージ間の抵抗変化の差を利用してことで、温度ドリフトなどの誤差要因を排除し、測定精度を向上させる。本手法により、従来の MEMS プロセスでは困難な傾斜を持つコルゲート構造を含む 3D 形状を高精度に設計・製造できる。また、プロセスが簡便でありレーザ加工と高い親和性を有するため、迅速な試作に適している。

本研究では、波形型および膜型の圧力センサを設計・製作し、その感度と特性を評価することで、本提案手法の有効性を実証した。

2. 設計・製作

2・1 センサ設計

図 1 に提案する LIG コリゲート圧力センサの概念を示す。デバイスはセンサ、アクリルプレート、および治具で構成されており、センサは PI フィルムを UV レーザで切断することにより製作する。センサの表面には、等幅の 4 つの同心円状の溝が形成されており、裏面にはこれらと交互に配置された 3 つの同心円状の溝および中央に円形の溝が配置されている。これらの溝は、LIG ひずみゲージが連続して接続されるように傾斜が付けられている。LIG ひずみゲージは CO₂レーザを用いて形成され、1 つは表面の

最外周に配置され、もう1つは裏面に対称的に配置されている。コルゲート構造により、面外変位とひずみが増大し、LIGひずみゲージの感度が向上する構造である。

図2(a)にセンサ素子の設計図を示す。基板となるPIフィルムは、長さ20 mm、幅15 mm、厚さ100 μm の楕円形であり、変形領域は直径10 mmの円形である。コルゲート構造は、LIGひずみゲージが切断されないように可能な限り薄く設計されている。コルゲート構造は、幅750 μm 、溝底幅250 μm 、溝深さ60 μm の溝から構成されており、同心円状に配置された4つのドーナツ型溝が表面に、3つのドーナツ型溝と中央の1つの円形溝が裏面に配置されている。これらの溝は、表面と裏面で交互に配置され、断面は台形状のコルゲート構造を形成している。コルゲート構造は、厚さ40 μm 、溝深さ60 μm 、溝から溝までの距離を1.25 mmとして設計されている。LIGひずみゲージは、表面と裏面の両側に配置され、それぞれ対称的かつ同一の形状を有している。LIGひずみゲージは幅1 mmのU字型であり、導電ペーストを使用しない領域は約5 mmである。

図2(b)に全体のセンサ設計を示す。PIフィルムは、アクリルプレートに挟まれ、治具で固定されている。アクリルプレートはセンサ部の表面と裏面にそれぞれ配置され、厚さは1 mmである。治具は厚さ4 mm、直径4 mm、高さ8 mmの円筒部を有し、中央には直径2 mmの貫通穴が設けられている。

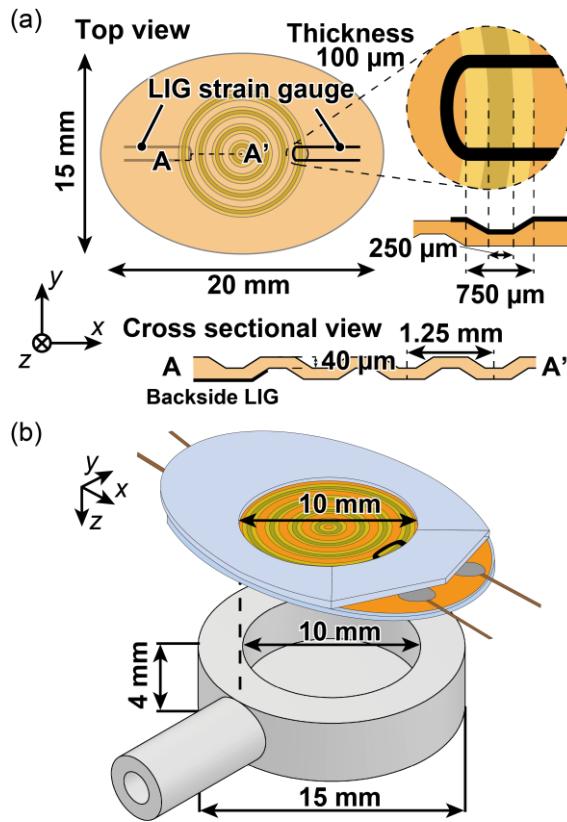


図2 センサの設計図¹⁾。

2・2 製作

図3に提案する圧力センサの製造プロセスを示す。基板材料として、PIフィルム(HJA-A4-100 μm , JMT社製)を使用した。まず、波長355 nmのUVレーザ加工機(UV-PROF-001, Profit社製)を用いて、PIフィルムの表面に溝を形成した後、デバイスの形状に切断し、裏面にも溝を形成した(図3(i))。溝の形成には、UVレーザ照射により、PIフィルム表面に25 μm 間隔で格子状にエッチングを行った。さらに、レーザ照射幅を段階的に狭めることで、テーパ状の溝を形成した。具体的には、溝の開口幅は750 μm で、照射幅を583 μm , 417 μm , 最終的に250 μm まで徐々に狭めることで、V字形の溝が実現された。1回のレーザ照射による溝の深さは約1.9 μm であり、設計通りに形成された。次に、PIフィルムにアクリルプレートを接着した(図3(ii))。その後、CO₂レーザ加工機

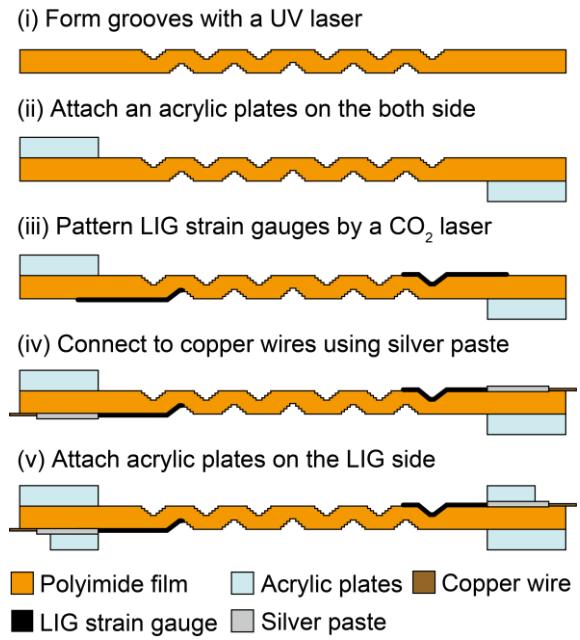


図3 センサの製作プロセス¹⁾。

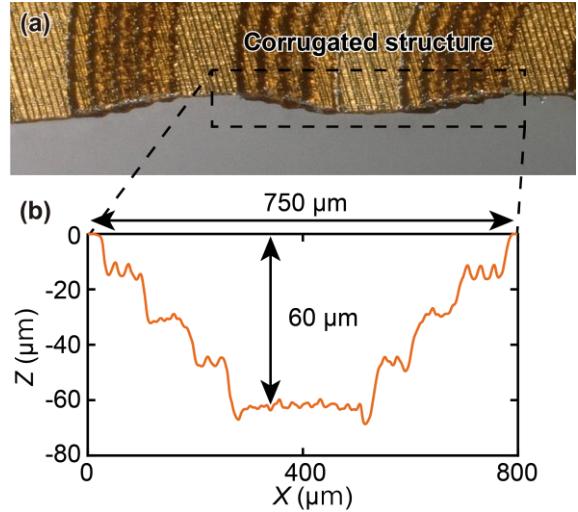


図4 コルゲート構造の断面プロファイル¹⁾。

(CO2-PROF-001, Profitec 社製) を用いて、コルゲート状の PI フィルムの両面に LIG ひずみゲージを形成した (図 3(iii))。CO₂レーザの焦点は、PI フィルムの表面に合わせて調整された。LIG ひずみゲージと銅線は、導電ペースト (DOTITE AA-55, 藤倉化成社製) を用いて接続された (図 3(iv))。その後、銀ペーストを覆うようにアクリルプレートが取り付けられた (図 3(v))。最後に、製作されたセンサと治具は接着剤で接続された。

図 4(a)にコルゲート状に加工された PI フィルムの写真を示す。PI フィルムの断面がコルゲート構造であることが確認できる。図 4(b)は溝の断面形状を示しており、溝の開口幅は 750 μm, 深さは 60 μm であった。したがって、デバイスは設計通りに製作されたことが確認された。図 5(a)に製作したセンサ構造の全体図を示す。LIG ひずみゲージの形成中に PI フィルムは破損していないことが確認された。図 5(b)は、幅約 300 μm の LIG ひずみゲージの拡大図を示している。図 5(c)は、厚さ約 50 μm の LIG ひずみゲージの断面図を示している。ひずみゲージの初期抵抗は、R₁ = 485 Ω, R₂ = 520 Ω であった。LIG ひずみゲージは、共焦点ラマン分光法(InVia Raman Microscope, Renishaw plc.)を用いて解析された。励起波長は 532 nm であった。得られたラマンスペクトル (図 5(d)) には、1341 cm⁻¹ (D バンド), 1575 cm⁻¹ (G バンド), および 2679 cm⁻¹ (2D バンド) の 3 つの明瞭なピークが確認され、形成された LIG はグラフェンであることが確認された。

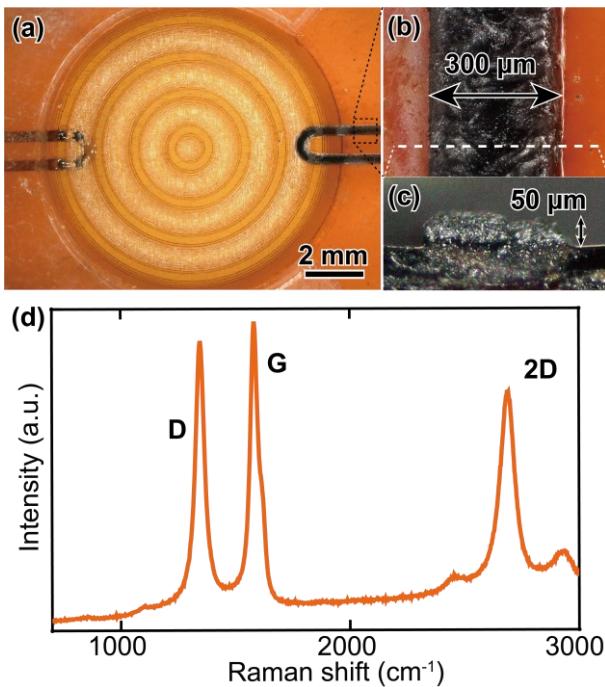


図 5 (a)製作したコリゲート構造¹⁾。(b)LIG ひずみゲージの拡大写真¹⁾。(c)LIG ひずみゲージの断面写真¹⁾。(d)形成された LIG ひずみゲージのラマン分光スペクトル¹⁾。

3. 実験

3・1 圧力に対する変形

図 6 に製作したセンサを示す。提案するコルゲート型センサの性能を評価するために、同じ製造プロセスを用いて、コルゲート構造を持たないセンサ (メンブレン型センサ) も製作した。まず、加圧によって生じる中央変位を測定した。変位の測定には 3D 形状測定機、圧力の印加には圧力校正器を使用した。測定は、-1 kPa から +1 kPa までの範囲で 0.2 kPa ごとに 11 点で実施した。図 7(a)は、メンブレン型センサの表面形状を示し、図 7(b)は、-1 kPa, 0 kPa, +1 kPa の圧力が印加されたときのコルゲート型センサの表面形状を示している。圧力が印加されていない状態でも、

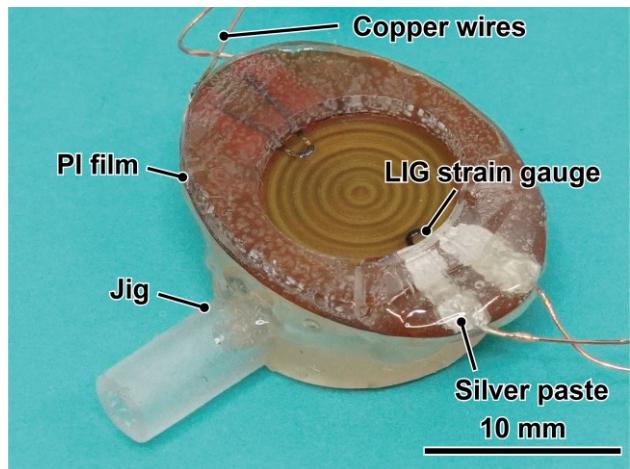


図 6 製作したセンサ¹⁾。

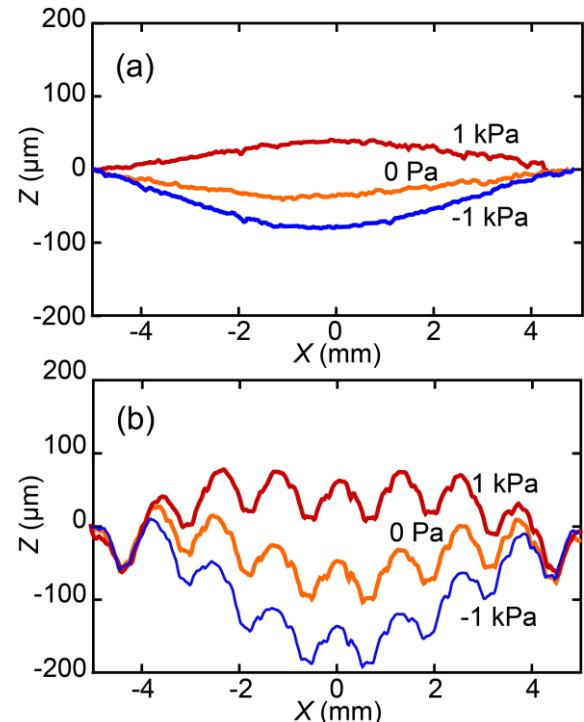


図 7 (a) コルゲート型センサおよび (b) メンブレン型センサに印加された圧力に対する表面プロファイル¹⁾。

試料は自身の重さによってわずかに変形していることが確認された。図7に示すように、正圧が印加されるとPIフィルムは上方に変位し、負圧が印加されると下方に変位することが確認された。

図8は、2種類のセンサにおける圧力に対する中央変位を示している。中央変位は、圧力が印加されていない基準点から変形領域の中心までの高さ変位である。メンブレン型センサの変位は $59 \mu\text{m}/\text{kPa}$ であり、コルゲート型センサの変位は $110 \mu\text{m}/\text{kPa}$ であり、コルゲート型センサの変位はメンブレン型センサの1.86倍であった。

3・2 圧力に対する抵抗値変化

図9(a)にセンサ応答の実験セットアップを示す。LIGひずみゲージの抵抗変化は、增幅回路(図9(b))を用いて電圧変化に変換された。またセンサ応答は-1 kPaから+1 kPaの範囲において0.1 kPa間隔で20点で測定された。電圧変化の記録には、オシロスコープを使用した。圧力の印加には、前項の実験セットアップと同じ圧力校正システムが使用された。図10は、コルゲート型センサに1 kPa(図10(a))および-1 kPa(図10(b))の空気圧を印加した際のLIGひずみゲージの抵抗変化を示している。圧力は3秒後に印加され、7秒後に除荷された。各LIGひずみゲージは、正圧

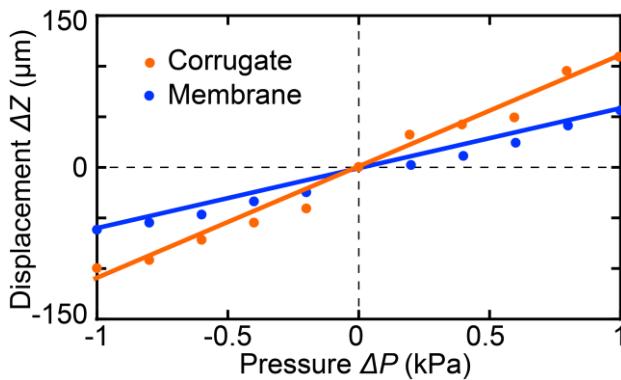


図8 2種類のセンサの圧力に対する中央変位¹⁾。

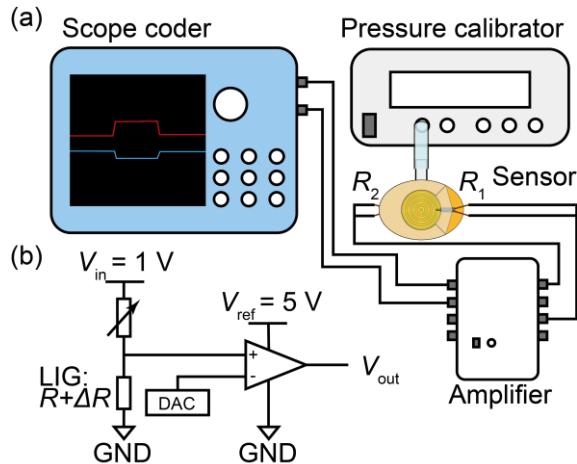


図9 (a)センサの感度を測定するための実験の模式図。(b)増幅回路の模式図¹⁾。

および負圧に対して反対方向に反応した。図10(c)に、コルゲート型およびメンブレン型センサに対する-1 kPaおよび1 kPaの印加圧力に対するセンサ応答を示す。圧力が0 Paに戻ると、抵抗変化もゼロに戻った。

図11に、-1 kPaから+1 kPaまでの各センサの応答を示す。センサ応答は、2つのゲージ間の差を考慮して計算され、圧力印加前と圧力印加中の平均値の差として定義された。両センサは、圧力に対して線形な応答を示した。グラフの傾きは、センサ感度を示す指標である。コルゲート型センサとメンブレン型センサの感度は、それぞれ $1.62 \times 10^{-2} \text{kPa}^{-1}$ および $0.56 \times 10^{-2} \text{kPa}^{-1}$ であった。全体として、コルゲート型センサの感度はメンブレン型センサの約3倍となることが確認できた。

4. 結論

本研究では、LIGひずみゲージを用いたコルゲート型圧力センサを提案した。提案するコルゲート型圧力センサは、

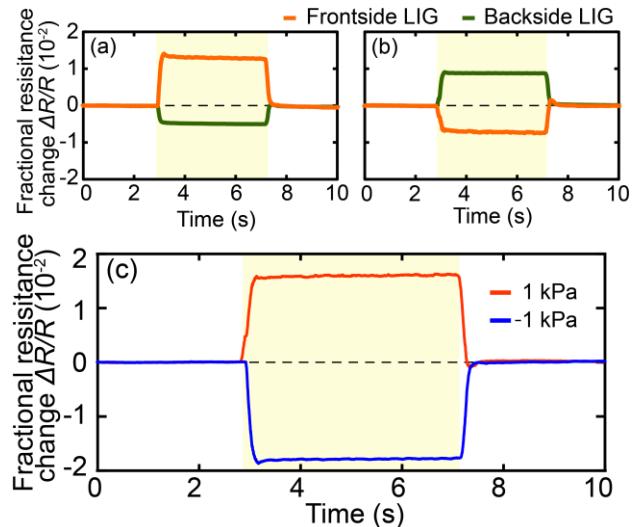


図10 (a) 1 kPa の圧力が印加された場合の各 LIG ひずみゲージの抵抗変化¹⁾。(b) -1 kPa の圧力が印加された場合の各 LIG ひずみゲージの抵抗変化¹⁾。(c) 1 kPa および-1 kPa の圧力が印加された場合のセンサの応答¹⁾。

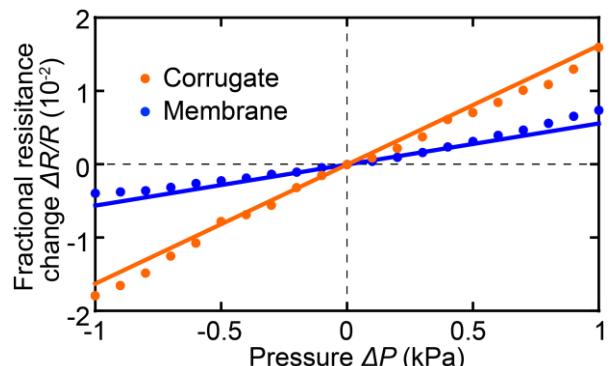


図11 コルゲート型センサおよびメンブレン型センサにおける圧力と抵抗変化率の関係¹⁾。

CO₂レーザおよびUV レーザを用いて製作した。センサ基板にはポリイミドフィルムを使用し、UV レーザにより表面および裏面に溝を形成することで、波状の断面構造を実現した。圧力下での変位およびセンサ応答を評価するために、コルゲート型センサとメンブレン型センサを用いた比較実験を行った。コルゲート型センサは、0.11 μm/Pa の変位、約 1.6×10^{-2} kPa⁻¹ の感度を示し、メンブレン型センサと比較して、変位は約 1.8 倍、感度は約 2.9 倍に向上した。提案する圧力センサは、レーザのみで製作可能であり、高い設計自由度を有する。そのため、幅広いセンサへの応用が可能であると考えられる。

謝 辞

本研究は天田財団の奨励研究助成を受けて実施されました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) R. Oda, R. Nakashima and H. Takahashi, "Laser-induced graphene based pressure sensor with corrugated polyimide diaphragm," *IEEE Sensors Journal*, vol. 25, no. 25, pp. 8115-8123, 2025.
- 2) J. Yang, "A harsh environment wireless pressure sensing solution utilizing high temperature electronics," *Sensors (Switzerland)*, vol. 13, no. 3, pp. 2719–2734, 2013.
- 3) G. Moagăr-Poladian, C. Tibeică, V. Georgescu, F. M. Chilom, V. Moagăr-Poladian, and O. Tutunaru, "Pressure sensor for hostile media," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 303, 2020.
- 4) R. B. Gajula, S. Mahata, A. Pingali, and S. K. Jindal, "MEMS capacitive pressure sensor: analysis, theoretical modeling, simulation and performance comparison of the effect of a conical notch," *Eng. Res. Express*, vol. 6, no. 4, 2024.
- 5) V. Sakthivelpathi, T. Li, Z. Qian, C. Lee, Z. Taylor, and J. H. Chung, "Advancements and applications of micro and nanostructured capacitive sensors: A review," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 377, no. July, p. 115701, 2024.
- 6) C. Ge and H. Chen, "Piezoelectric Field Effect Transistors (Piezo-FETs) for Bionic MEMS Sensors: A Literature Review," *J. Bionic Eng.*, pp. 2717–2729, 2024,
- 7) G. Wei et al., "Surface-mountable VZO film-based piezoelectric sensors array in foil for underwater fluctuating pressure measurements," *IEEE Sens. J.*, vol. 24, no. 20, pp. 33112–33119, 2024.
- 8) S. G. Prabhu, K. Kamath, S. Nuthalapati, N. Veera Pandi, and M. A. Goutham, "Biologically inspired piezoresistive MEMS acoustic vector sensor for underwater applications," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 377, no. July, p. 115666, 2024.
- 9) A. T. Tulaev, A. S. Kozlov, J. V. Belyaev, V. V. Loboda, M. A. Bellavin, and A. S. Korotkov, "MEMS Pressure Sensors Design, Simulation, Manufacturing, Interface Circuits: A Review," *IEEE Sens. J.*, vol. 24, no. 6, pp. 7395–7405, 2024.
- 10) H. Takahashi, N. M. Dung, K. Matsumoto, and I. Shimoyama, "Differential pressure sensor using a piezoresistive cantilever," *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 22, no. 5, 2012.
- 11) Z. Zhang, M. Song, J. Hao, K. Wu, C. Li, and C. Hu, "Visible light laser-induced graphene from phenolic resin: A new approach for directly writing graphene-based electrochemical devices on various substrates," *Carbon N. Y.*, vol. 127, pp. 287–296, 2018.
- 12) Z. Chen, W. Ren, L. Gao, B. Liu, S. Pei, and H. M. Cheng, "Three-dimensional flexible and conductive interconnected graphene networks grown by chemical vapour deposition," *Nat. Mater.*, vol. 10, no. 6, pp. 424–428, 2011.
- 13) R. Ye, D. K. James, and J. M. Tour, "Laser-Induced Graphene: From Discovery to Translation," *Adv. Mater.*, vol. 31, no. 1, pp. 1–15, 2019.
- 14) J. Lin et al., "Laser-induced porous graphene films from commercial polymers," *Nat. Commun.*, vol. 5, pp. 5–12, 2014.
- 15) A. F. Carvalho et al., "Laser-Induced Graphene Strain Sensors Produced by Ultraviolet Irradiation of Polyimide," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 28, no. 52, pp. 1805271-n/a, 2018.
- 16) Y. K. Shin, K. H. Kim, and M. H. Seo, "Investigation of LIG-based pressure sensors with various silicon-based elastomeric encapsulation layers," *Micro Nano Syst. Lett.*, vol. 11, no. 1, 2023.