

[研究助成 (C)]

切り紙・折り紙構造を用いた MEMS 三軸触覚センサアレイ

2237008

研究代表者
(助成金受領者)慶應義塾大学
大学院理工学研究科

後期博士課程

中 島 利八郎

[研究の目的]

Microelectromechanical systems (MEMS) を用いた多軸力センサは、人間の触覚評価や、生物学分野、ロボティクスをはじめとする多様な分野で重要な役割を担っている。MEMS 力センサの中でも、ひずみに対して電気抵抗が変化するピエゾ抵抗効果を利用したピエゾ抵抗型力センサは構造が比較的単純であることから数多く研究開発されている。これらのピエゾ抵抗型の多軸力センサにおいて、デバイス側面方向の力を表面方向の力に対し独立して検出するためには、側面の応力集中領域にピエゾ抵抗素子を配置し、三次元的なセンサ構造を実現することが有効である。しかし、従来の MEMS プロセスは主に基板表面上での二次元的な積層加工が中心であるため、デバイス側面のような三次元領域に対して任意形状のピエゾ抵抗層を形成することは困難であった。また、デバイス側面へのピエゾ抵抗形成のためのドーピング工程を実現するためには、追加工程や特殊なプロセスが必要となり、製作工程の複雑化、製作難易度の増大、およびデバイス設計自由度の制限といった問題が生じていた。

そこで本研究では、レーザ加工とレーザドーピングを組み合わせることで、機械的構造と電気的素子を三次元的に形成可能な MEMS 多軸力センサ製作プロセスを提案する。提案する手法により、デバイス表面および側面への任意の

二次元形状のピエゾ抵抗層が直接形成が可能となり、高い独立性を有する多軸力計測への応用が期待できる。

[研究の内容、成果]

提案する手法の概要を図1上に示す。まず、レーザ加工によって材料となる Si ウエハをセンサ形状に加工する。その後、センサ構造の表面と側面の応力集中領域に対して、センサ素子となるピエゾ抵抗層をレーザドーピングによ

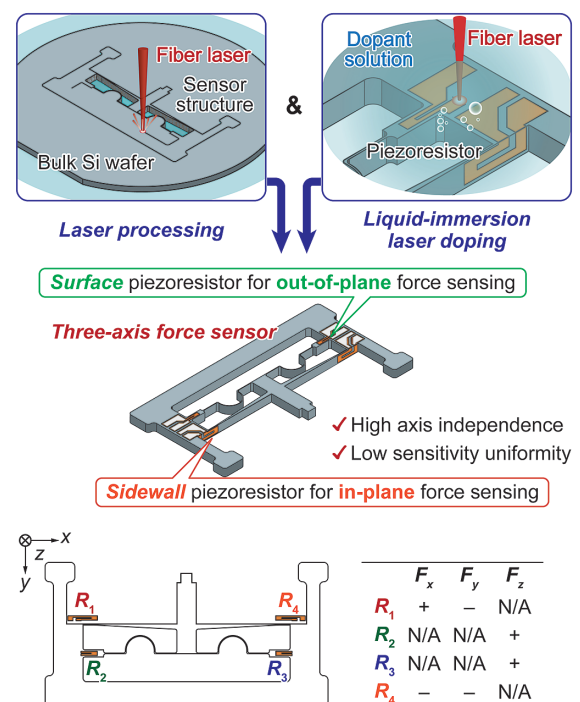


図1 提案する手法の概要

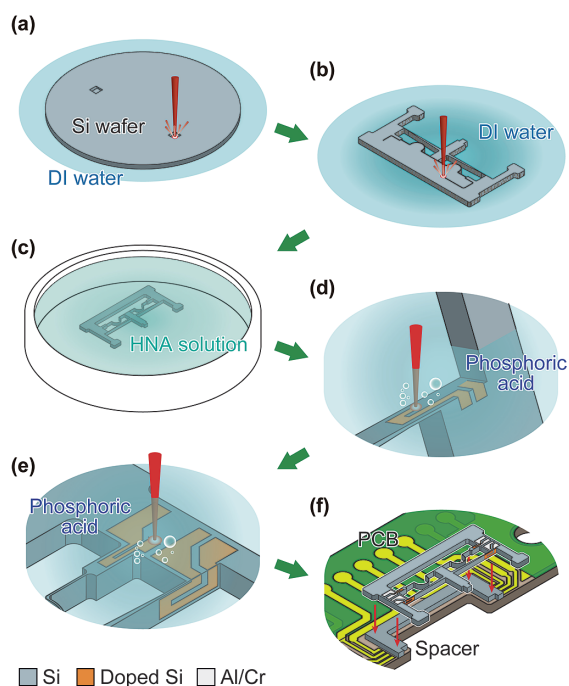


図2 製作プロセス

て形成する。レーザドーピングではレーザ照射箇所のみにピエゾ抵抗層が形成可能である。そのため、センサ素子上の任意の面に二次元形状のピエゾ抵抗層が形成できる。また、液浸式のレーザドーピングによって、側面ピエゾ抵抗層をセンサ表面まで配線することが可能となる。このような手法によって形成される、3次元的なセンサ構造とセンサ素子配置によって、提案するセンサは多軸力に対して独立した応答を示す。

図1下に多軸力に対するセンサ素子の応答を示す。面外力である z 軸方向の力に対しては、センサ素子表面に形成されたピエゾ抵抗層の R_2 と R_3 が応答する。一方で、面内力である x 軸と y 軸方向の力に対しては、センサ素子側面に形成されたピエゾ抵抗層の R_1 と R_4 が応答する。このように、多軸力に対するセンサ素子の応答は独立している。

図2に提案するセンサ素子の製作プロセスを示す。まず、高出力のレーザ照射によって、Siウエハから裏面にノッチ構造が形成された、センサ構造体を切り出した。次に、レーザ切断に

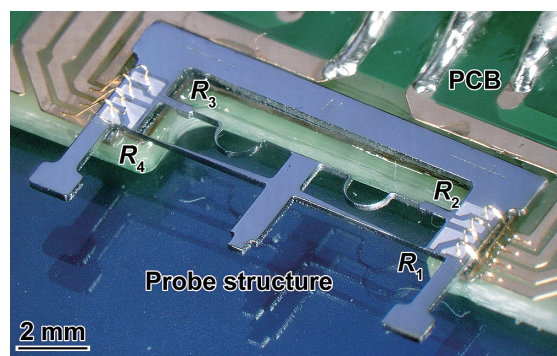


図3 製作したセンサ

よってセンサ素子側面に生じたデブリを除去するため、Siのエッチャントによって、センサ構造体全体を等方的にエッチングした。続いて、リン酸を用いた液浸式のレーザドーピングによって、センサ素子側面と表面にピエゾ抵抗層を形成した。最後に、電極を形成し、基板と電気的に接続することでセンサを製作した。本研究では波長 1064 nm, パルス幅 350 ns のファイバーレーザ加工機を用い、レーザカットとレーザドーピングはレーザ照射条件を調整することで、実施した。

図3に製作したセンサの写真を示す。センサ構造及びピエゾ抵抗層は概ね設計通りに製作された。この時、センサチップ外形は 15 mm 四方に収まり、支持梁構造の最小幅は 40 μm で、ピエゾ抵抗層の幅は 80 μm であった。また、4つのピエゾ抵抗の抵抗値はすべて概ね 1.5 k Ω であった。

図4に三軸力に対するセンサの応答を示す。図4(a)から順に、 x 軸方向、 y 軸方向、 z 軸方向からの力に対する、各ピエゾ抵抗層の抵抗変化率を示している。面内力である x 軸方向と y 軸方向からの力に対しては、 R_1 と R_4 が線形に応答し、それ以外のピエゾ抵抗層はほぼ応答していない。また、 R_1 に関しては応答の正負が逆転している。一方、 z 軸方向からの力に対しては、 R_2 と R_3 が線形に正の応答を示し、それ以外のピエゾ抵抗層はほぼ応答を示していない。よって、三軸の力に対して、センサは独立した応答を示した。また、センサの応答の独立

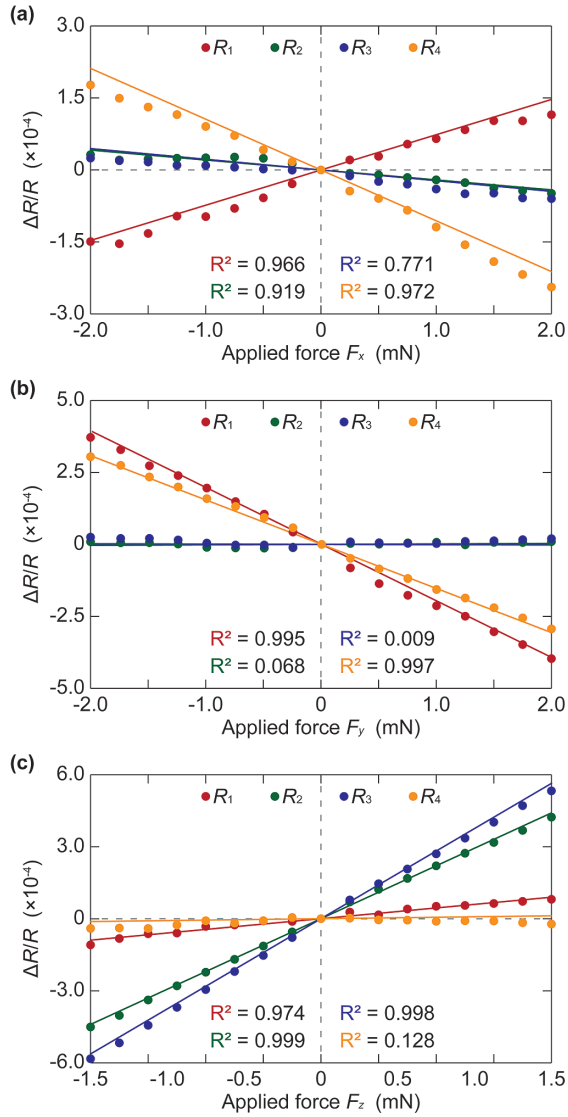


図4 三軸に対する応答

性を評価するため、センサの感度ベクトル間のコサイン類似度を求めた。コサイン類似度はベクトルの方向の類似性を示すため、この値が直角に近ければ、応答に独立性があると言える。以下にコサイン類似度の角度表記を示す。

$$\begin{pmatrix} 0 & 87 & 100 \\ 87 & 0 & 96 \\ 100 & 96 & 0 \end{pmatrix}$$

x 軸と y 軸の感度ベクトルは互いに約 87° 、 x 軸と z 軸の感度ベクトルは互いに約 100° 、 y 軸と z 軸の感度ベクトルは互いに約 96° の角度をなしており、すべての軸間において、一定の応

答独立性が確保されていることが確認された。また、ノイズレベルから算出したセンサの分解能は概ね 0.1 mN であった。よって、製作したセンサは 0.1 mN 程度の三軸の微小力を独立して計測できることが示された。

以上の結果より、提案するレーザドーピングを利用したセンサ製作プロセスは、側面ピエゾ抵抗を有する MEMS 多軸力センサの有効な製作手法であることが示された。

[成果の発表, 論文など]

【国際論文誌】

1. R. Nakashima *et al.*, "Piezoresistive cantilever for in-plane force measurement using liquid-immersion laser sidewall doping," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 36, no. 1, Art. no. 015012, 2026.
2. R. Nakashima *et al.*, "Laser-based fabrication of piezoresistive cantilevers utilizing pulse laser annealing," *Adv. Sens. Res.*, vol. 4, no. 11, Art. no. e00092, 2025.
3. R. Nakashima and H. Takahashi, "Triaxial tactile sensor utilizing standing laser-induced graphene cantilevers on polyimide film," *Sens. Actuators A Phys.*, vol. 365, Art. no. 114919, 2024.

【国際学会】

1. R. Nakashima *et al.*, "Laser-fabricated piezoresistive force sensor with liquid immersion laser sidewall-doping," *Proc. Transducers 2025*, pp. 255-258, Orlando, USA, Jun. 29- July 3, 2025.
2. R. Nakashima *et al.*, "Laser-based fabrication process for piezoresistive cantilever using flash laser annealing," *Proc. of MEMS2024*, pp. 614-617, Austin, USA, Jan. 21-25, 2024.
3. R. Nakashima and H. Takahashi, "6-axis force-torque sensor utilizing four pairs of standing laser-induced graphene cantilevers," *Proc. of IEEE Sensors 2023*, 1345, Vienna, Austria, Oct. 29 - Nov. 1, 2023.

【国内学会】

1. 中島利八郎 他, "液浸レーザ側壁ドーピングを用いたピエゾ抵抗型力センサ," 第42回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 11P2-D-3, ライトキューブ宇都宮, 栃木, Nov. 10-13, 2025.
2. 中島利八郎 他, "レーザアニールを用いて一括製作したピエゾ抵抗型カンチレバー," 第41回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 26A2-D-1, 仙台国際センター, 宮城, Nov. 25-28, 2024.
3. 中島利八郎 他, "RES構造と斜立したLIGカンチレバーを利用した三軸触覚センサ," 第40回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 6P3-M-4, 熊本城ホール, 熊本, Nov. 6-9, 2023.