

レーザドープニングを利用した
MEMS ピエゾ抵抗型多軸力センサ

2025 年度

中島 利八郎

学位論文 博士（工学）

レーザードーピングを利用した
MEMS ピエゾ抵抗型多軸力センサ

2025 年度

慶應義塾大学大学院理工学研究科

中島 利八郎

論文要旨

レーザドーピングを利用した MEMS ピエゾ抵抗型多軸力センサ

Microelectromechanical systems (MEMS)を用いた多軸力センサは、生物学分野や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piezo抵抗効果を利用したpiezo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開発されている。これらのpiezo抵抗型のセンサにおいて、デバイス側面方向の力を独立して検出するためには、側面の応力集中領域にpiezo抵抗素子を配置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piezo抵抗層を形成することは困難であった。また、側面方向へのドーピング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、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。本手法により、デバイス表面および側面への任意形状のpiezo抵抗層の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。本論文ではまず、表面レーザドーピングを用いてpiezo抵抗型カンチレバーを製作し、レーザドーピングを含むレーザ加工が、表面piezo抵抗形成およびセンサ製作手法として有効であることを確認した。さらに、液浸レーザドーピングにより側面piezo抵抗を形成し、側面方向へのドーピングが可能であり、それを利用したpiezo抵抗型力センサの製作が実現できることを示した。最後に、デバイス表面および側面にpiezo抵抗を形成した三軸力センサを製作し、多軸力が独立して検出可能であることを実験的に検証した。これらの検討を通じて、提案するレーザドーピングを利用した製作プロセスは、側面piezo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。

Thesis Abstract

MEMS piezoresistive multi-axis force sensor using laser doping

Multi-axis force sensors based on microelectromechanical systems (MEMS) play an important role in various fields, including biology and robotics. Among MEMS force sensors, piezoresistive force sensors that utilize the change in electrical resistance induced by mechanical strain have been widely developed owing to their relatively simple structures. For these piezoresistive sensors, placing piezoresistive elements on stress-concentrated regions of the device sidewalls is effective for independently detecting lateral force components. However, conventional MEMS processes rely primarily on two-dimensional, surface-based layer fabrication, making it difficult to form piezoresistive layers with arbitrary shapes on three-dimensional regions such as sidewalls. Furthermore, realizing sidewall doping requires additional processing steps or specialized fabrication techniques, resulting in increased process complexity, higher fabrication difficulty, and limitations on device design flexibility.

This study, we proposes a MEMS multi-axis force sensor fabrication process that enables three-dimensional formation of mechanical structures and piezoresistive elements by combining laser machining and laser doping. The proposed method allows direct formation of arbitrarily shaped piezoresistive layers on both the device surface and sidewalls, enabling multi-axis force sensing with high independence. First, piezoresistive cantilevers were fabricated using surface laser doping, and the results confirmed that laser machining combined with laser doping is effective for forming surface piezoresistors and for fabricating piezoresistive sensors. Next, piezoresistors were formed on device sidewalls using liquid-immersion laser doping, and it was demonstrated that sidewall doping is feasible and can be applied to the fabrication of piezoresistive force sensors. Finally, a three-axis force sensor incorporating piezoresistors on both the surface and sidewalls was fabricated, and independent detection of multi-axis forces was experimentally verified. Through these investigations, the proposed laser-doping-based fabrication process was shown to be an effective method for producing MEMS multi-axis force sensors equipped with sidewall piezoresistors.

目次

第1章	序論	1
1.1	本研究の目的	1
1.2	研究の背景と従来の研究	2
1.2.1	MEMS センサによる多軸力計測と設計上の課題	2
1.2.2	従来の MEMS プロセスにおける側面パターンニングおよび三次元構造形成	5
1.2.3	レーザを用いた半導体材料の電気的特性改質	6
1.3	本研究で提案する MEMS ピエゾ抵抗型多軸力センサの製作手法	8
1.4	本研究の意義	9
1.5	本論文の構成	10
第2章	原理	12
2.1	本章の概要	12
2.2	ピエゾ抵抗効果を利用した MEMS 力センサ	12
2.2.1	ピエゾ抵抗効果	12
2.2.2	ピエゾ抵抗型カンチレバー	14
2.2.3	抵抗変化の計測原理	16
2.3	レーザドーピングの原理	17
2.3.1	レーザドーピングの概要	17
2.3.2	ドーパント源の状態によるドーパント供給挙動	18
2.3.3	吸収長とドーピング深さ	18
2.4	本章の総括	20
第3章	表面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー	21
3.1	本章の概要	21
3.2	プロセス概要および設計	22
3.2.1	提案するプロセスの概要	22
3.2.2	設計	23
3.2.3	シミュレーション	25

目次

3.3	製作.....	26
3.3.1	使用したレーザ加工機.....	26
3.3.2	レーザ照射条件.....	28
3.3.3	製作プロセス.....	32
3.3.4	製作したセンサの構造評価.....	34
3.3.5	形成したピエゾ抵抗層の組成および結晶性評価.....	37
3.4	ピエゾ抵抗層の電気的特性評価.....	41
3.4.1	電流電圧特性の評価.....	41
3.4.2	温度特性の評価.....	44
3.5	センサの機械的特性評価.....	45
3.5.1	ばね定数の評価.....	45
3.5.2	共振周波数の評価.....	46
3.5.3	センサ固定部のばね定数の推定.....	48
3.6	センサの応答特性評価.....	50
3.6.1	ノイズレベルの評価.....	50
3.6.2	入力した変位，力に対する応答評価.....	52
3.6.3	繰り返し負荷に対する応答評価.....	53
3.7	本章の総括.....	54
3.7.1	本章の結論.....	54
3.7.2	本章の考察.....	55
第4章	液浸側面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー.....	57
4.1	本章の概要.....	57
4.2	プロセス概要および設計.....	58
4.2.1	提案するプロセスの概要.....	58
4.2.2	設計.....	59
4.2.3	シミュレーション.....	61
4.3	製作.....	63
4.3.1	レーザ照射条件.....	63
4.3.2	製作プロセス.....	70
4.3.3	側面粗さ低減量の評価.....	73

目次

4.3.4	製作したセンサの構造評価.....	75
4.3.5	ピエゾ抵抗層の組成および結晶性評価.....	76
4.4	側面ピエゾ抵抗層の電気的特性評価.....	81
4.4.1	電流電圧特性の評価.....	81
4.4.2	温度特性の評価.....	82
4.5	センサの機械的特性評価.....	83
4.5.1	ばね定数の評価.....	83
4.5.2	共振周波数の評価.....	84
4.6	センサの応答特性評価.....	86
4.6.1	ノイズレベルの評価.....	86
4.6.2	入力した変位, 力に対する応答評価.....	87
4.6.3	繰り返し負荷に対する応答評価.....	89
4.7	本章の総括.....	90
4.7.1	本章の結論.....	90
4.7.2	本章の考察.....	91
第5章	液浸レーザドーピングを利用した MEMS ピエゾ抵抗型三軸力センサ	93
5.1	本章の概要.....	93
5.2	センサ概要および設計.....	94
5.2.1	提案するセンサの概要.....	94
5.2.2	設計.....	95
5.2.3	シミュレーション.....	97
5.3	製作.....	99
5.3.1	レーザ照射条件.....	99
5.3.2	製作プロセス.....	104
5.3.3	製作したセンサの構造評価.....	107
5.4	センサの特性評価.....	108
5.4.1	電流電圧特性の評価.....	108
5.4.2	ノイズレベルの評価.....	110
5.4.3	入力した力に対する応答評価.....	110
5.5	本章の総括.....	117

目次

5.5.1	本章の結論.....	117
5.5.2	本章の考察.....	118
第 6 章	結論.....	121
6.1	本研究の結論.....	121
6.2	今後の展望.....	122
謝辞.....		124
参考文献.....		128
付録.....		138
付録 A	使用した装置・薬品の一覧.....	138
付録 B	使用した PCB の設計.....	142
付録 C	ワイヤボンダの条件	144
付録 D	表面カンチレバーの機械的特性評価	145
付録 E	第 5 章で使用したブリッジアンプ回路のドリフト評価.....	147

第1章 序論

1.1 本研究の目的

本研究の目的は、微小な多軸力計測に必要となる、各軸力に対する高い応答独立性と均一な力感度を有する Microelectromechanical systems (MEMS) 多軸力センサを実現するための製作手法を確立することである。応答独立性の向上に向けて、側面ピエゾ抵抗の選択的パターンニングを行い、各力成分に対するセンサ応答の分離を図る。また、感度ばらつきの低減を目的として、局所ひずみ量の制御に有利な高アスペクト比支持梁構造を採用し、ピエゾ抵抗配置と組み合わせることで感度の均一化を目指す。レーザ加工によるセンサ構造形成とレーザドーピングによるピエゾ抵抗形成を組み合わせることで、従来の平面への積層を基盤とする MEMS 製作手法では困難であった、三次元構造上へのセンサ素子形成を可能とする多軸力センサ製作手法を提案する。

近年、微小な力が多軸方向に発生する状況を対象として、多軸力を計測可能なセンサの研究開発が進められている。その背景には、触覚フィードバックや手術支援技術などの工学的ニーズや、微小動物や細胞が発生させる力を直接計測することで行動や生命活動の理解につなげる生物学的ニーズがある。特に、後者のように微小な計測対象を扱う場合、対象に直接接触させることが可能な微小なセンサ構造が求められる。また、接触方向に依らず力を適切に計測するためには、各軸方向で近い力感度を有すること、各軸方向の力入力に対する応答の独立性が確保されていることが重要である。

これまで、微小な多軸力を計測するため、MEMS 技術を用いた多軸力センサが提案されてきた。微小力を計測する方式はいくつかの選択肢があるが、その中でもピエゾ抵抗方式は、センサ構造が比較的シンプルであり、構造設計の自由度が高い点で有利である。センサの表面と側面にピエゾ抵抗を形成し、面外力と面内力を独立して計測するというコンセプトの MEMS ピエ

第1章 序論

ゾ抵抗型多軸力センサが開発されてきたが、各軸方向で近い力感度と高い応答独立性を同時に満たす例は報告されていない。これは、従来の MEMS プロセスが材料となるウエハ表面への二次元的な積層プロセスを基盤としており、センサ構造および素子配置の配置が平面内の設計に制約されているからである。その結果、三次元方向の力を計測する場合、応答の独立性の低下や力感度のばらつきが生じてしまう。

そこで、本研究では、レーザ加工によるセンサ構造形成とレーザドーピングによるピエゾ抵抗形成を組み合わせることで、センサ構造とセンサ素子を三次元的に形成可能な MEMS 力センサ製作手法を提案する。本手法では、レーザ加工を用いることで、面内および面外方向の外力にそれぞれ選択的に変形するセンサ構造を形成できる。さらに、レーザドーピングを用いることで、センサ構造の表面および側面のひずみ集中部に対し、選択的にピエゾ抵抗層を形成できる。これにより、各軸方向で近い力感度と高い応答独立性を両立する MEMS 多軸力センサ製作手法の確立を目指す。

1.2 研究の背景と従来の研究

1.2.1 MEMS センサによる多軸力計測と設計上の課題

近年、微小な力が多軸方向に発生する状況を対象として、多軸力を計測可能なセンサの研究開発が進められている [1]。その背景には、ロボットハンドの触覚フィードバックや手術支援技術に代表される工学的ニーズが挙げられる [2], [3]。また、微小動物や細胞が発生させる力を計測し、行動や生命活動の理解につなげる生物学的ニーズもある [4]–[6]。特に、微小動物や細胞のようにミリスケールやマイクロスケールの計測対象を扱う場面では、対象に直接接触させることが可能な微小なセンサが求められる。そのような多軸力計測においては、接触方向に依らず力を適切に計測するために、各軸方向で近い力感度を有することが重要である。また、各軸方向の力入力に対する応答が互いに干渉しないよう、クロストークが低く、応答の独立性が確保されていることも重要である。

このような小型かつ高感度な多軸力センサの実現に向けて、MEMS 技術を用いた多軸力センサが提案されてきた [7]。ここで、MEMS センサとは、微小な機械的構造と電氣的素子を集積したセンサシステムのことであり、半導体製造装置を用いた MEMS プロセスによって製作される [8]。また、MEMS プロセスとは、フォトリソグラフィを基盤とした機能性薄膜の積層プロセスである。材料となるウエハ上に機能性薄膜を成膜し、パターンを転写するリソグラフィ工

第1章 序論

程と、不要な材料を選択的に除去するエッチング工程を繰り返すことで、ウエハ上に二次元形状のセンサ構造や回路パターンを形成する [9]. このため、製作される MEMS センサは、平面構造が積層された二次元的な形状となる. 本研究では、材料となるウエハおよび製作プロセスによって形成される構造の表面、つまり製作における基準面を「表面」と定義する. また、表面に対して垂直に形成される構造面を「側面」と定義する. また、表面に平行な方向を「面内方向」、垂直な方向を「面外方向」と定義する.

微小対象への適用を想定したプローブ型の MEMS 力センサでは、ピエゾ抵抗方式や静電容量方式などの動作原理を用いたセンサが提案されている [10]–[17]. これらのセンサは、力を受けるプローブとそれを支持する複数の支持梁、そしてそれらを固定する土台構造から構成される. ピエゾ抵抗方式は支持梁に発生する機械的ひずみを電気抵抗の変化として検出する方式である [10]–[12]. センサ構造が比較的単純であるため、ばね定数や共振周波数などの機械的特性を設計に反映しやすいという利点を有する. 一方、多軸力計測を実現するためには、力方向ごとにひずみを適切に分離して検出できるよう、ピエゾ抵抗層の配置とセンサ構造設計が重要となる. 静電容量方式はプローブ構造に形成された複数の電極構造の電極間距離や重なり面積の変化を容量変化として検出する方式である [13]–[15]. 高感度である一方、微細な電極を要するため構造が複雑となり、センサ設計の自由度は制限される. 光学方式は変位やひずみを光学的に検出する方式である [16], [17]. 高い分解能が得られる一方で、光学系の構築が必要となるため、多軸化は容易ではない. そこで本研究では、微小対象への適用を想定したプローブ型の MEMS 力センサとして、各軸での感度の整合とクロストークの低減を両立する観点から、構造設計の自由度が高いピエゾ抵抗方式に着目する.

ピエゾ抵抗方式において応答の独立性を高めるには、各軸力に対して主として変形する支持梁構造を設計し、その変形によりひずみが集中する領域にピエゾ抵抗層を配置することが重要である. また、各軸方向の力感度を揃えるためには、各軸方向のばね定数を近づけ、発生するひずみの大きさを整合させる設計が有効である. このような設計思想は、起歪体とひずみ検出素子を組み合わせたマクロスケールの力覚センサでも用いられており、力成分ごとの独立性を確保しやすいことが知られている [18]. 同様の設計思想に基づき、MEMS ピエゾ抵抗型多軸力センサにおいても、表面と側面にピエゾ抵抗層を直交するように配置する構成が提案されている [19]–[23]. この構成では、表面ピエゾ抵抗によって面外方向の力を、側面ピエゾ抵抗によって面内方向の力を検出することで、多軸方向の力を独立して計測することを目指している. しかし、このような構成においても、各軸方向で近い力感度を実現し、感度の独立性を十分に確保したセンサは実現されていない. これは、MEMS プロセスがウエハ表面を基準とした二次元

第1章 序論

的な積層プロセスであることに起因する。

通常、ピエゾ抵抗層の形成には、ウエハに対してドーパント原子を注入するドーピング工程が必要となる [24]。ウエハ表面にドーピングを防ぐ保護膜を事前にパターニングしてからドーピングを行えば、所望の位置および形状にピエゾ抵抗層を形成可能である。ただし、ウエハ表面への露光・現像を前提とした現行のリソグラフィ工程では、保護膜のパターニングはウエハ表面にしか実行できない。その結果、側面ピエゾ抵抗は支持梁側面への一様な形成に限定される。また、側面ピエゾ抵抗の配線は、その両端から外力の影響を受けないセンサの土台構造表面まで接続させる必要がある。この際、ひずみ検出に寄与しない配線用の支持梁が必要となり、設計自由度が低下する。プロセス条件によっては、本来ひずみ検出を意図しない表面領域にピエゾ抵抗層が形成される場合があり、クロストークの原因となることがある。また、側面ドーピングのためには、ドーパントを注入したい側面のみをエッチングによって事前に露出させる工程が必要であり、製作プロセス複雑化や難度の増加という課題も存在する。したがって、面内方向の変形のみに応答し、配線用の支持梁を介さず土台構造表面に配線される側面ピエゾ抵抗を、簡便に形成できる手法が望まれている。

一方、MEMS センサの構造は、基本的にはウエハをエッチングすることで形成される。そのため、センサの支持梁の厚さは Silicon on insulator (SOI) ウエハのデバイス層厚によって実質的に決定される。梁構造のばね定数は、面外方向では梁の幅と厚さの三乗に依存し、面内方向では梁の幅の三乗と厚さに依存する。このとき、支持梁の厚さが一定であるため、面外方向のばね定数は構造設計によって調整可能な範囲が小さい。その結果、各軸方向で近いばね定数を同時に実現することは難しい。また、応答の独立性を高めるためには、表面ピエゾ抵抗が形成された支持梁は面外方向にのみ変形しやすく、側面ピエゾ抵抗が形成された支持梁は面内方向にのみ変形しやすいことが望ましい。表面ピエゾ抵抗が形成される支持梁については、ウェットエッチングなどを用いて、梁の幅に対して厚さが十分に小さい、すなわち面内方向に対して高いアスペクト比を有する梁構造を形成する手法が報告されている [25]。一方、側面ピエゾ抵抗を有する支持梁では、側面ドーピング後に梁の厚みに対して幅が十分に小さい、すなわち面外方向に高いアスペクト比を有する梁構造を形成することが難しい。これは、側面ピエゾ抵抗を狙った側面のみに形成できないため、側面ピエゾ抵抗層の形成には、側面のみの露出、ドーピング、センサ構造の形成という三工程が必要となるからである。その結果としてレジストの形成精度や表面張力およびアライメント精度などの影響により、側面ピエゾ抵抗を保護しつつ梁幅の小さい構造を形成することが困難であるためである。したがって、表面ピエゾ抵抗が形成された支持梁は面内方向に、側面ピエゾ抵抗が形成された支持梁は面外方向に、それぞれ高い

第1章 序論

アスペクト比を有するようなセンサ構造の実現が望ましい。

以上より、ピエゾ抵抗方式の MEMS 多軸力センサ設計においては二つの課題が存在する。第一に、側面に対してセンサ素子として有用な二次元形状のピエゾ抵抗層を形成するとともに、ひずみ検出に寄与しない領域を介さず短距離で配線することが困難であるという素子形成上の課題である。第二に、従来の MEMS プロセスの制約下では支持梁構造のアスペクト比を面内・面外方向の双方で高アスペクト比を有する構造を実現することが難しい。そのため、各軸方向のばね定数を整合させることが困難となり、結果として力感度の整合および独立性の確保が難しいというセンサ構造形成上の課題がある。したがって、側面を含む三次元構造上にピエゾ抵抗層を選択的に形成可能であり、かつ面内・面外方向それぞれに対して高いアスペクト比を有する支持梁構造を実現できる製作プロセスが求められている。

1.2.2 従来の MEMS プロセスにおける側面パターニングおよび三次元構造形成

前述のような要求に対して、MEMS 分野においては側面パターニング技術や三次元微細構造形成手法が検討されてきた。側面パターニングの一例としては、傾斜イオンビームエッチングを用いた、構造物の側面に Si の酸化膜や窒化膜をパターニングする手法が提案されている [26]。この手法では、構造物の上部のみ、あるいは中央部のみといった側面上の特定の高さ領域に対して成膜が可能である。しかし、プロセスの特性上、露出しているすべての側面に同一のパターンが形成されるため、特定の側面のみを選択的にパターンを形成することはできない。また、形成されるパターンは、側面上における同一高さ方向に沿った一次元的な帯状形状に限定される。そのため、側面ピエゾ抵抗に必要となるような、配線を考慮した二次元形状の保護膜パターニングには適用できない。また、ウエハ表面から側面が露出した溝構造に対して、表面側から張り出すようにレジスト膜を形成し、現像後に表面と側面の境界エッジにおいてレジスト膜が折れ曲がることを利用して、側面にパターンを転写する手法も報告されている [27]。この手法では、最小 10 μm 程度のパターン形成が可能であるという利点がある。しかし、形成されるパターンはエッジから溝の底方向への一次元的な形状に限定される。そのため、側面からの配線を想定した二次元形状のレジストパターニングは困難である。このように、側面へのパターニング手法自体はいくつか検討されているものの、報告例は限定的であり、側面上において任意の位置に任意の二次元形状パターンを形成可能な方法は依然として確立されていない。

一方で、MEMS プロセスの制約を補完する目的で、三次元的な微細構造形成手法も検討されてきた [28], [29]。例えば、マイクロ 3D プリンティングによるマイクロスケールデバイスの製作 [30], [31]、多光子重合を用いたサブマイクロスケールの三次元微細構造の形成 [32], [33]、集

束イオンビームによるマイクロマシニング[34], [35], 超短パルスレーザを用いた選択的エッチング[36], [37]などが挙げられる。これらの技術は、従来のリソグラフィを基盤とした MEMS プロセスでは実現が困難であった三次元形状が形成可能であり、構造設計の自由度を拡張できる点で有用である。しかし、多くの場合、これらの手法は三次元構造の形成そのものを主目的としており、MEMS センサに必要となる電氣的素子の形成までを含めた一体的なプロセスとして用いられている例は限られている。そのため、側面上の任意位置においてパターニングされた二次元形状の電氣的素子と高アスペクト比な支持梁構造を組み合わせたセンサ製作は、MEMS プロセスにおける既存手法の延長では実現が困難である。

1.2.3 レーザを用いた半導体材料の電氣的特性改質

前節でも述べたように、レーザ加工は MEMS 分野において、三次元的な微細構造を形成する手法の一つとして利用されてきた。一方でレーザ加工は構造形成だけでなく、半導体材料の電氣的特性を局所的に改質する手法としても用いられてきた。本節では、レーザによる電氣的特性改質の代表例としてレーザアニーリングとレーザドーピングを取り上げ、それぞれの背景と特徴を整理する。

半導体プロセスにおいては、イオン注入法によるドーピングは、任意の深さに任意の量のドーパントを導入可能な手法である。そのため、デバイスの微細化に伴う浅い接合形成の要求に応じて発展してきた [38]。しかし、イオン注入後には、注入に伴って生じた結晶損傷の回復に加え、導入したドーパントを置換位置に移動させる電氣的活性化が不可欠である [39]。従来、これらの処理は主に炉を用いた熱アニールによって行われてきた。一方で、炉を用いたアニール処理はサンプル全体を高温に加熱する処理であるため、局所領域や浅い表面領域を活性化対象としていても、ドーパントの再拡散や、デバイス全体への熱履歴による特性の劣化が生じる可能性がある [40]。このような課題に対し、レーザアニーリングは照射領域のみを短時間で加熱することで熱履歴を低減しつつ、結晶損傷の回復およびドーパント活性化を実現する手法として研究されてきた [41]。レーザアニーリングは照射条件により、基板が溶融しない固相アニーリングと、表面が溶融して再凝固する液相アニーリングに大別される [42]。両者の遷移はレーザ種別そのものよりも、主にフルエンスとパルス幅により決まり、一般に長パルスでは融点未満に温度を制御しやすいため固相となりやすい一方、短パルス照射では表面温度が急上昇して溶融に至り、液相となりやすい。この特徴を活かし、結晶欠陥の回復やドーパントの活性化に加えて [43], アモルファス Si の多結晶化 [44], [45], 金属シリサイド形成など [46], [47], レーザアニーリングを基盤とする多様な技術も提案されている。

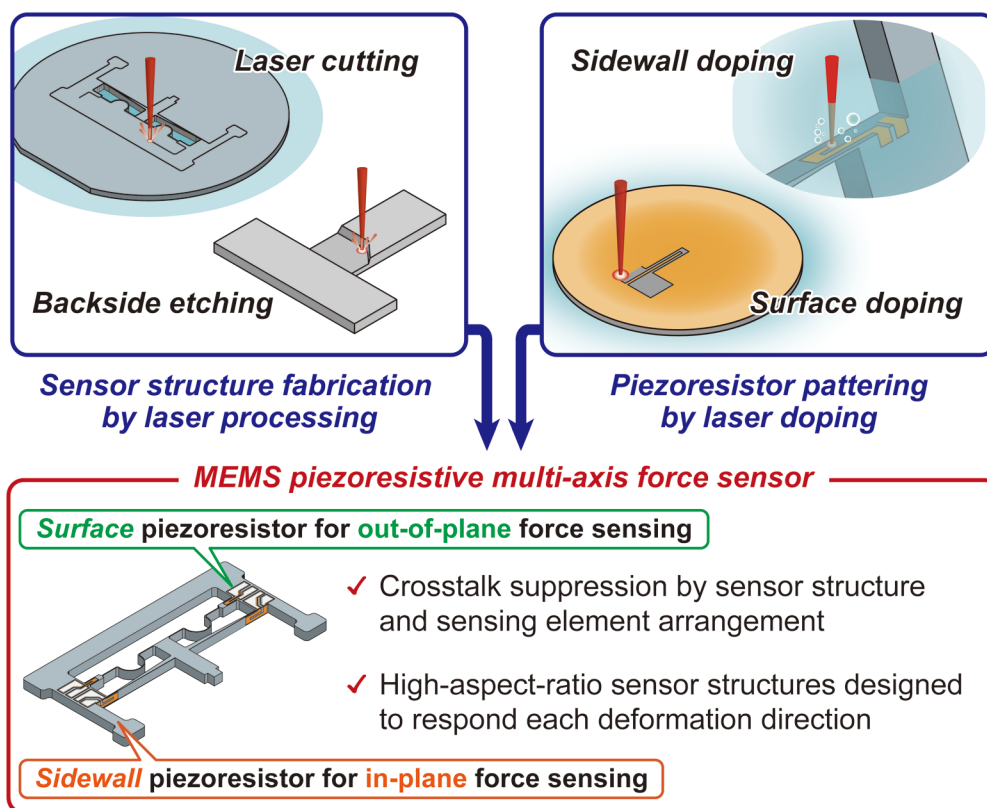


Figure 1.1 本研究で提案する MEMS ピエゾ抵抗型多軸力センサ製作手法の概念図.

一方、レーザドーピングは、レーザ照射をドーパントの活性化にとどめず、ドーパント導入そのものを行うことを目的として研究されてきた [48], [49]. レーザ照射による瞬間的な表面溶融を利用し、基板表面に接しているドーパントを溶融層中へ取り込み、拡散と再結晶を経て導入と電気的活性化を同時に行う手法である [50]–[52]. レーザアニリングと同様に、レーザ照射による短時間で局所的な高温状態を実現することにより、基板全体に大きな熱履歴を与えることなく、必要な領域のみにドーピングを施すことが可能である. また、レーザ出力やパルス幅、繰返し周波数などの照射条件を調整することで、ドーピング深さや濃度分布をある程度制御できる柔軟性を有する. そのため、太陽電池分野においては、大面積ウエハ上に浅い pn 接合や局所高濃度領域を選択的に形成する必要から、レーザドーピングの応用が研究されている [51]. さらに、レーザドーピングはドーパント源とレーザ波長の組合せによって適用範囲を拡張できる点も特徴である. 気体 [53], [54], 液体 [55], [56], 固体 [57], [58], など様々な状態のドーパント源と、紫外から近赤外までの幅広い波長のレーザを組み合わせることで [59]–[61], Si のみならず Ge [62], [63], SiC [64], [65] といった IV 族半導体や、III-V 族半導体である GaAs [57], な

らびにダイヤモンドなど [66], [67], 多様な半導体材料へのドーピングにも応用されている。

以上より、レーザを用いた三次元微細構造形成と半導体材料の電気的特性改質は、これまで独立して発展してきた技術であるものの、いずれもレーザ照射を基盤とする点で共通している。そのため、原理的には同一装置内で連続的に実行することも可能である。したがって、三次元的な構造形成が可能なレーザ加工と、照射領域に対して選択的に電気的機能を付与できるレーザドーピングを組み合わせることで、従来の MEMS プロセスでは困難であった三次元形状へのセンサ素子形成を実現できる可能性がある。

1.3 本研究で提案する MEMS ピエゾ抵抗型多軸力センサの製作手法

本研究では、レーザ加工によるセンサ構造形成とレーザドーピングによるピエゾ抵抗層形成を組み合わせることで、センサ構造とセンサ素子を三次元的に形成可能な MEMS 力センサ製作手法を提案する。提案する製作手法の概念図を Figure 1.1 に示す。提案する手法により、従来の MEMS ピエゾ抵抗型多軸力センサ製作において課題であった、側面への二次元的なピエゾ抵抗層パターンニング、および面内・面外方向それぞれに対して高アスペクト比な支持梁構造へのピエゾ抵抗形成を目指す。提案する手法では、レーザ加工による切断およびエッチングを用いて、Si ウエハを直接加工することで、センサ構造を形成する。これにより、面外方向や面内方向に変形しやすい高アスペクト比の支持梁構造など、変形方向に応じて設計されたセンサ構造を形成することが可能となる。また、後工程としてウェットエッチングを組み合わせることで、側面粗さやデブリを低減し、センサ素子形成に適した表面状態を得ることができる。一方、センサ素子であるピエゾ抵抗層は、レーザドーピングによって形成される。ドーパント源と接した状態のセンサ構造に対してレーザを照射することで、照射箇所にもみドーパントが導入される。その結果、デバイス表面および側面に対して選択的に目的とする二次元形状を有するピエゾ抵抗層を形成することが可能となる。

レーザドーピングはレーザ照射箇所のみをドーピングするため、デバイス表面および側面のひずみ集中部に対して選択的にピエゾ抵抗層を形成することが可能である。また、レーザ走査パスに沿って二次元形状のピエゾ抵抗層を形成できることから、特に側面ピエゾ抵抗においては、配線用の支持梁を介さずとも土台構造表面へ配線を伸ばすことが可能である。そのため、従来手法で課題となっていたクロストークを抑制し、各軸方向に対する感度の独立性を向上させることが可能である。さらに、配線のための支持梁が不要となるため、センサ構造および素子配置の設計自由度が向上する。また、本手法ではセンサ構造形成とセンサ素子形成を独立し

第1章 序論

た工程として行われる。そのため、ピエゾ抵抗層の形成条件がセンサ構造設計の制約とならない。これにより、表面ピエゾ抵抗が形成された支持梁は面内方向に、側面ピエゾ抵抗が形成された支持梁は面外方向に、それぞれ高いアスペクト比を有するようなセンサ構造が設計可能となる。

本研究では、提案する製作手法の有効性を検証するため、センサ応答特性およびセンサ構造に関して以下の通りの目標値を設定する。センサ応答の独立性に関しては、各軸の感度ベクトルのなす角度および各軸の感度の大きさに着目する。感度ベクトル間の独立性を評価する指標としてコサイン類似度を用い、すべての軸方向入力に対する感度ベクトル間のコサイン類似度が 0.2 以下となることを目標とする。また、応答感度の均一性に関しては、力に対するセンサの応答のオーダ同程度となることを目標とする。また、センサ素子のひずみに対する感度も重要であるため、感度を表す指標であるゲージ率にも着目する。本研究で用いる単結晶 Si のピエゾ抵抗層は、金属材料と比較して一桁以上高いゲージ率を有している。そこで、実用的なひずみ検出に十分な感度を確保するため、ゲージ率の値が 10 以上となることを目標とする。一方、センサ構造に関しては、支持梁のアスペクト比に着目する。従来の MEMS プロセスを用いた側面ピエゾ抵抗が形成された支持梁では、製作上の制約により、支持梁幅は支持梁厚のおよそ 1/2 程度までしか微細化できなかった。本研究では、側面ピエゾ抵抗が形成された支持梁において、梁幅が梁厚の 1/5 以下となる構造の実現を目標とする。

1.4 本研究の意義

本研究の工学的な新規性は以下の二点である。第一に、レーザドーピングを MEMS 力センサ製作プロセスに適用し、表面のみならず側面を含む三次元構造上にピエゾ抵抗層を形成する点である。第二に、センサ側面上に二次元形状のピエゾ抵抗層が直接パターンニングされた MEMS センサを実現する点である。これらの新規性によって、本研究で実現したセンサは、既存の MEMS プロセスによって製作された多軸力センサと比較し、各軸方向の力に対する応答の独立性が高いという優位性を有する。また、レーザ照射位置のみにピエゾ抵抗層が形成されるというレーザドーピングの特性に着目し、ウエハ表面への積層を前提とした MEMS プロセスを側面領域へと拡張した点に、本研究の独創性がある。さらに、既存プロセスでは両立が困難であった側面へのピエゾ抵抗層の二次元形状でのパターンニングと、高アスペクト比の側面支持梁構造を同時に実現している点も、本研究の特徴である。以上の理由から、本研究は MEMS 多軸力センサ製作技術の発展に寄与する工学的意義を有する研究である。

第1章 序論

また、既存の MEMS プロセスにおいては、デバイス形状の形成には深掘りイオンエッチング装置、ドーピングには熱拡散炉やイオン注入装置など、工程ごとに専用とする半導体製造装置が必要であった。さらに、任意の形状加工や局所的なドーピングのためにはリソグラフィ工程が必要であった。一方、本手法では構造形成と素子形成のいずれもレーザ照射のみで実施可能であり、レーザ照射の走査パスを変更するだけで、構造形状およびセンサ素子の設計を柔軟に変更できる。また、設計変更から試作までのリードタイムも既存手法と比較して短い。これらの特徴から、提案手法は MEMS ピエゾ抵抗型センサのラピッドプロトタイピング技術としての応用可能性も期待される。

1.5 本論文の構成

本論文は全 6 章から構成される。以下に各章の概要を示す。

第1章 序論

本研究の目的について述べ、本研究の背景とそれに関連する従来研究について述べる。また、提案するセンサ製作手法について述べ、本研究の意義について論じた。

第2章 原理

提案するピエゾ抵抗型カンチレバーおよび、レーザドーピングに関する基礎的な原理について述べる。

第3章 表面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー

レーザドーピングを用いた多軸力センサ製作の第一段階として、レーザ加工とレーザドーピングを組み合わせた提案手法により、ピエゾ抵抗型 MEMS 力センサが実際に製作可能であることを実証する。まず、提案するデバイス表面へのピエゾ抵抗形成手法を述べる。次に、製作したセンサの構造評価、形成したピエゾ抵抗層の結晶性評価およびドーブ濃度分布の評価について述べる。最後に、ピエゾ抵抗層の電気的特性、センサの機械特性および応答特性について評価する。それら基礎特性の評価を通じて、提案した表面レーザドーピングによるピエゾ抵抗型センサの製作手法の有用性について考察する。

第4章 液浸側面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー

レーザドーピングを用いた多軸力センサ製作の第二段階として、第3章で確立したレーザドーピングによる表面ピエゾ抵抗層形成手法を基盤として、液浸レーザドーピングによる側面ピ

第1章 序論

エゾ抵抗層形成手法を確立する。まず、提案するデバイス側面へのピエゾ抵抗形成手法を述べる。次に、製作したセンサの構造評価、形成したピエゾ抵抗層の結晶性評価およびドーピング濃度分布の評価について述べる。その後、ピエゾ抵抗層の電気的特性、センサの機械特性および応答特性について評価する。最後に、製作したカンチレバーの性能を既存のセンサと比較し、本手法の有効性について考察する。

第5章 液浸レーザドーピングを利用した MEMS ピエゾ抵抗型三軸力センサ

レーザドーピングを用いた多軸力センサ製作の最終段階として、第4章で確立した液浸レーザドーピングによるピエゾ抵抗パターンニング手法を利用して、各軸方向で近い力感度と高い応答独立性を両立する MEMS ピエゾ抵抗型三軸力センサの製作手法を確立する。まず、提案するセンサの概要および、製作する三軸力センサの設計について述べる。次に、提案するセンサの製作手法ならびに得られたデバイス形状の評価について述べる。その後、ピエゾ抵抗層の電気的特性およびセンサの応答特性について評価する。最後に、製作した三軸力センサの性能を既存のピエゾ抵抗型 MEMS 多軸力センサと比較し、本手法の有用性について考察する。

第6章 結論

本研究の結論、および今後の展望について述べる。

第2章 原理

2.1 本章の概要 ---

本章では，ピエゾ抵抗型カンチレバーおよび，レーザドーピングに関する基礎的な原理について述べる．まず，ピエゾ抵抗効果の定義と，抵抗変化率，ゲージ率，結晶方位依存性の関係について述べる．次に，ピエゾ抵抗効果を利用した代表的な構造であるピエゾ抵抗型カンチレバーを取り上げ，先端荷重とピエゾ抵抗の抵抗変化率との関係を示す．そして，ブリッジ回路とアンプを用いた抵抗変化率の電圧信号への変換原理について述べる．最後に，レーザドーピングの基本的な原理と，レーザ波長，パルス幅，フルエンスとドーピング深度の関係について概説する．

2.2 ピエゾ抵抗効果を利用した MEMS カセンサ ---

2.2.1 ピエゾ抵抗効果

まず，ピエゾ抵抗型 MEMS カセンサの計測原理となる，ピエゾ抵抗効果について説明する．ピエゾ抵抗効果とは，金属や半導体の結晶に応力を印加した際，電気抵抗が変化する現象であり，金属では小さいが半導体では大きな抵抗変化を示す．

幅と厚みが w の正方形断面で，長さが l ，抵抗率 ρ の抵抗体がある時，その抵抗値 R は以下のように表される．

$$R = \frac{\rho l}{w^2} \quad (2.1)$$

この抵抗体に応力が加えられて長さ方向に Δl 伸張した場合，そのひずみ ϵ は次式で表される．

 第2章 原理

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (2.2)$$

幅 w の変化量 Δw は、ポアソン比 ν を用いて以下の式で表される．

$$\Delta w = -\nu \varepsilon w \quad (2.3)$$

抵抗体の応力による抵抗変化率を評価するため、式(2.1)の両辺を自然対数を取り、微分すると次のように表される．

$$\frac{\partial R}{R} = \frac{\partial \rho}{\rho} + \frac{\partial l}{l} - 2 \frac{\partial w}{w} \quad (2.4)$$

よって、抵抗体の抵抗変化率は次のように表される．

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + (1 + 2\nu)\varepsilon \quad (2.5)$$

ここで抵抗体のゲージ率 GF は以下のように定義される．

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} \quad (2.6)$$

抵抗体が金属の場合、ひずみによって抵抗率はほぼ変化しないため、ゲージ率は形状変化に依存する $1+2\nu$ のみで表される．金属のポアソン比は一般的に 0.3 前後であるため、ゲージ率は 1.4 から 2.0 程度となる．一方、Si をはじめとする半導体材料では、応力の印加によってバンド構造が変化し、キャリア移動度が大きく変化する．そのため、ゲージ率においては形状変化の項に比べて抵抗率変化の項が数十倍以上となり、抵抗率変化の項が支配的となる[24]．

次に、半導体抵抗体における抵抗率変化の式を示す．電流方向と平行な応力 σ_l 、垂直な応力 σ_t が抵抗体に印加された場合、抵抗率変化はピエゾ抵抗係数を用いて、次式で表される．

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t \quad (2.7)$$

ここで、 π_l と π_t は電流方向と、電流と垂直方向のピエゾ抵抗係数である．これらのピエゾ抵抗係数 π_l と π_t は半導体材料の結晶方位に依存し、ピエゾ抵抗係数のテンソル成分 π_{11} 、 π_{12} 、 π_{44} を用いて、次式で表される．

$$\pi_l = \pi_{11} - 2(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^2 m_1^2 + m_1^2 n_1^2 + n_1^2 l_1^2) \quad (2.8)$$

$$\pi_t = \pi_{12} + (\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^2 l_2^2 + m_1^2 m_2^2 + l_1^2 l_2^2) \quad (2.9)$$

ここで、 l_i 、 m_i 、 n_i はピエゾ抵抗中の電流の流れと、半導体結晶の<100>方向のなす角 ϕ を用い

Table 2.1 Si の(100)面におけるピエゾ抵抗のテンソル成分

Doping type	π_{11} [10^{-11} /Pa]	π_{12} [10^{-11} /Pa]	π_{44} [10^{-11} /Pa]
n-type	-102.2	53.4	-13.6
p-type	6.6	-1.1	138.1

Table 2.2 Si の(100)面におけるピエゾ抵抗係数

Doping type	Orientation	π_l [10^{-11} /Pa]	π_t [10^{-11} /Pa]
n-type	<100>	-102	53.4
n-type	<110>	-31.6	-17.6
p-type	<100>	6.6	-1.1
p-type	<110>	71.8	-66.3

て以下の式で表される.

$$\begin{pmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\phi) & \sin(\phi) & 0 \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

例えば, Si の(100)面上の<100>方向と<110>方向のピエゾ抵抗係数は, Table 2.1 のピエゾ抵抗のテンソル成分を用いて, Table 2.2 のように表される [68]. 典型的には, (100)面の Si において, n 型では<100>方向が, p 型では<110>方向が最大感度を示す[69]. よって, (100)面の Si のピエゾ抵抗係数を最大限利用する場合, n 型の場合は<100>方向を, p 型の場合は<110>方向を用いることが一般的である. また, ピエゾ抵抗の電流方向と応力方向を一致させることにより π_l の寄与が最大となり, 高い感度が得られる. 特に, n 型の<100>方向と p 型の<110>方向の場合, π_l と π_t の符号が逆になるため, ピエゾ抵抗として利用する際に横方向応力が混入しない設計が重要である.

2.2.2 ピエゾ抵抗型カンチレバー

そのようなピエゾ抵抗効果を利用したセンサ構造の 1 つに, ピエゾ抵抗型カンチレバーが挙げられる. 片持ち梁の根元にピエゾ抵抗層を形成した構造では, カンチレバー先端に加わる荷重により梁内部に応力が発生し, その応力をピエゾ抵抗によって電気信号として検出する. この時, カンチレバー長手方向と, ピエゾ抵抗層の電流方向を一致させることで, 荷重による抵抗値変化を最大化できる.

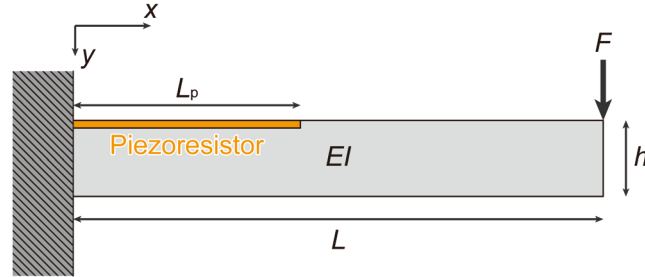


Figure 2.1 ピエゾ抵抗型カンチレバーの模式図.

Figure 2.1 に示すように、カンチレバーの厚みを h 、長さを L とし、カンチレバーの根元部分に、厚み h_p 、長さ L_p のピエゾ抵抗層が形成されているとする。この時、先端に力 F が加わった時、根元からの位置 x における曲げモーメント $M(x)$ は、次式で与えられている。

$$M(x) = F(L - x) \quad (2.11)$$

この時、ピエゾ抵抗層の厚みが h_p がカンチレバーの厚み h に対し十分薄い場合、ピエゾ抵抗層表面に生じる応力はカンチレバー表面の曲げ応力で近似できる。

$$\sigma(x) \approx \frac{M(x)h}{2I} = \frac{F(L - x)h}{2I} \quad (2.12)$$

ここで、 I は断面二次モーメントで、以下の式で表される。

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (2.13)$$

このピエゾ抵抗層中の電流方向が、カンチレバーの長手方向と一致している場合、ピエゾ抵抗層の抵抗変化率はピエゾ抵抗係数 π_1 を用いて、以下の式で与えられる。

$$\frac{\Delta R}{R}(x) \approx \pi_1 \sigma(x) \quad (2.14)$$

ピエゾ抵抗層が根元から長さ L_p まで分布しているため、抵抗層全体の抵抗変化率は長さ方向の平均として、

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R}{R} &= \frac{1}{L_p} \int_0^{L_p} \pi_1 \sigma(x) dx \\ &= \frac{\pi_1 h}{2I} \left(L - \frac{L_p}{2} \right) F \end{aligned} \quad (2.15)$$

と求められる。したがって、このカンチレバーにおいて、抵抗変化率は加えられた力に対して

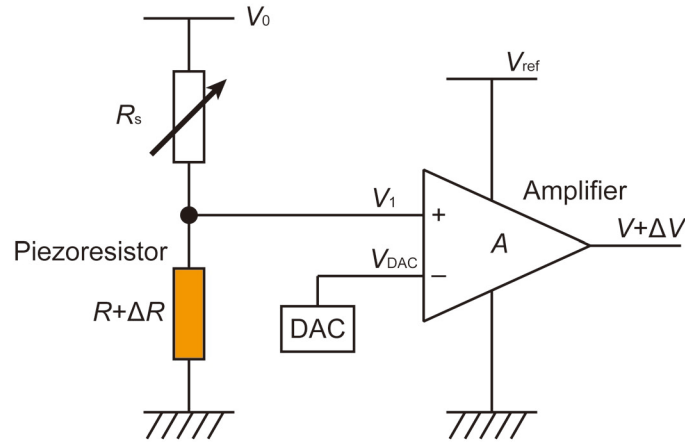


Figure 2.2 ピエゾ抵抗センサの計測回路の概念図.

線形に応答する．また，このようなピエゾ抵抗層が形成されたカンチレバー構造を複数軸方向に配置することで，多軸力が計測可能になる．

2.2.3 抵抗変化の計測原理

次に，カンチレバーに生じた抵抗変化率の計測方法について述べる．Figure 2.2 に示すように，ピエゾ抵抗の抵抗変化率は疑似的なホイートストンブリッジ回路によって電圧変化に変換し，その後アンプ回路によって増幅して測定する．この時，DAC から V_1 と同じ電圧を出力しブリッジ電圧を 0 にすることで，回路のオフセットを除去している．カンチレバーに荷重が加わり，ピエゾ抵抗層の抵抗値が R から $R + \Delta R$ まで変化したと仮定する．この時の抵抗変化率 $\Delta R/R$ と計測される電圧変化 ΔV の関係は，それぞれの抵抗値とアンプ倍率 A を用いて次式で表される．

$$\Delta V = V_0 \left(\frac{\Delta R R_s}{(R + \Delta R + R_s)(R + R_s)} \right) A \quad (2.16)$$

この時，可変抵抗の抵抗値 R_s はピエゾ抵抗の初期抵抗値 R と同じであり，ピエゾ抵抗の抵抗変化は初期抵抗に比べて微小であるため $\Delta R \ll R$ と近似すると，

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \left(\frac{\Delta R R}{(R + R)(R + R)} \right) A \approx A \frac{\Delta R}{4R} \quad (2.17)$$

と表される．よって，ピエゾ抵抗の抵抗変化率はブリッジアンプ回路の電圧変化として計測できる．

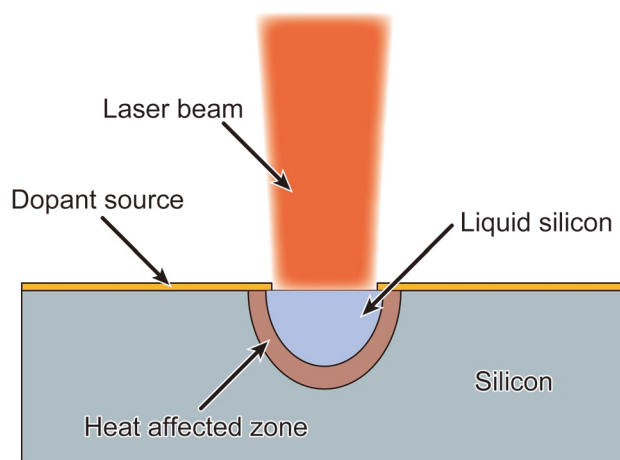


Figure 2.3 レーザドーピングの概念図.

2.3 レーザドーピングの原理

2.3.1 レーザドーピングの概要

本研究では Si ウェハを用いた MEMS 力センサ製作を対象とするため、本章ではレーザドーピングの原理を Si に限定して説明する。Si に対するレーザドーピングの概念図を Figure 2.3 に示す。レーザドーピングは、レーザ照射によって Si 基板表層を局所的に熔融させ、その後の急速な再結晶過程を利用してドーパント原子を Si 結晶中に取り込む手法である。ドーパント源が Si ウェハ表面に接触した状態でレーザを照射すると、照射領域近傍の Si が瞬間的に熔融し、液相状態となる。この熔融 Si 中においてドーパント原子は液相拡散により高速に移動し、その後、基板側からのエピタキシャル再結晶過程において結晶格子中に取り込まれ、電気的に活性化される。液相 Si 中におけるドーパントの拡散係数は、固相 Si 中における拡散係数と比較して 6 から 8 桁程度大きいことが知られている [70]。そのため、レーザ照射による Si の熔融時間が ns から μ s 程度と短時間であっても、ドーパント原子を数 μ m 程度の深さまで拡散させることが可能である。この液相 Si 中への拡散という点が、固相 Si 中への拡散のため 1000°C 前後で数分程度の熱処理を必要とする MEMS プロセスにおける熱拡散法とレーザドーピングとの本質的な違いである [71]。

 第2章 原理

2.3.2 ドーパント源の状態によるドーパント供給挙動

レーザドーピングにおけるドーパント供給挙動は、ドーパント源の物理的状态によって大きく異なる。本節では、本研究で用いる条件である 1064 nm 波長による P が含有する固相ドーパント源および液相ドーパント源に限定して、供給機構の違いを概説する。

固相ドーパント源の代表例としてスピノンドーパント (Spin-on dopant : SOD) が挙げられる。例えば P を含む SOD は焼成後、SiO₂ を主成分とする P を含むガラス膜を形成する。この膜において P は、リン酸塩として O を介して Si-O ネットワークに組み込まれた状態で存在する。レーザ照射時、波長 1064 nm のレーザ光はガラス膜では吸収が小さいため多くが透過し、主として Si 側で吸収されて温度が上昇する。このとき、Si の融点は 1414°C であり、ガラス膜である SiO₂ の軟化・熔融温度域はそれより高温側にあるため [72]、Si が優先的に熔融しやすい。Si 表層が熔融すると、ガラス膜と熔融 Si 界面近傍に存在する P-O 結合を持つリン酸基から P が供給され、熔融 Si 中で拡散した後、再凝固過程で結晶中に取り込まれる [73]。

一方、液相ドーパント源としてリン酸水溶液を用いる場合、ドーパントは液中で分子またはイオンとして存在し、SOD 中のようにネットワークへ固定化された状態ではない。波長 1064 nm のレーザ光はリン酸水溶液への吸収が少ないので [74], [75]、主として Si 側で吸収されて温度が上昇する。その結果、レーザ照射により Si 表層が局所的に熔融すると、熔融 Si は液相ドーパント源と直接接触し、P 成分が熔融 Si へ供給される。供給された P は熔融層内で拡散し、その後の結晶過程において結晶中へ取り込まれる。

2.3.3 吸収長とドーピング深さ

Si におけるレーザドーピングにおいて、形成されるドーパ層の深さは、レーザ照射によって生じる Si の熔融深さに強く依存する。レーザ光が Si 中を伝搬する際の光強度 $I(z')$ は、Beer-Lambert の法則に従い、表面からの深さ z' に対して、次式で表される。

$$I(z') = I_0 \exp(-\alpha z') \quad (2.18)$$

ここで、 I_0 は入射光強度、 α は Si の吸収係数である。吸収係数は、光強度が入射光強度の $1/e$ に減衰する距離の逆数として定義され、その距離を吸収長 L_{abs} と呼ぶ。

$$L_{\text{abs}} = \frac{1}{\alpha} \quad (2.19)$$

Si における吸収係数はレーザ波長に依存し、波長が短いほど吸収係数が大きく、吸収長が短く

第2章 原理

なる．例えば，レーザ波長が 350 nm 程度であれば吸収長は 9.6 nm 程度，レーザ波長が 530 nm 程度であれば吸収長は 1.3 μm 程度，レーザ波長が 1.06 μm 程度であれば吸収長は 900 μm 程度となる [76].

ここで，吸収長はレーザ光が Si 内部へ到達し得る距離の指標であり，そのままドーピング深度になるわけではない．レーザドーピングにおいては，ドーパントは主に熔融 Si 中で拡散し，再凝固過程で結晶中に取りこまれる．そのため，ドーピング深度は実際に熔融した Si の深さ h_{melt} によって決定される．ここで熔融深さ h_{melt} はエネルギーの吸収により生じる発熱分布と照射中の熱拡散により決まる温度分布から定義できる．深さ方向の一次元近似により，深さ方向を z' としたときの Si 中の温度分布 $T(z', t)$ は熱方程式に基づき以下の式で表される [77].

$$\rho(T)c_p(T)\frac{\partial T(z', t)}{\partial t} = k_{\text{th}}(T)\frac{\partial^2 T(z', t)}{\partial z'^2} + q(z', t) \quad (2.20)$$

ここで $\rho(T)$ は Si の密度， $c_p(T)$ は比熱， k_{th} は熱伝導率， t は時間である． $q(z', t)$ は単位体積あたりの発熱項であり，表面反射率 $R(\lambda)$ と吸収係数 $\alpha(\lambda)$ を用いて次式で表される．

$$q(z', t) = \alpha(\lambda)[1 - R(\lambda)]I(t)\exp[-\alpha(\lambda)z'] \quad (2.21)$$

ここで $I(t)$ は入射強度の時間波形である．初期条件は $T(z', 0) = T_0$ とする．温度場 $T(z', 0)$ において Si の融点 T_m を超える領域が熔融したとみなし，最大熔融深さは

$$h_{\text{melt}} = \max \{z' | T(z', t) \geq T_m\} \quad (2.22)$$

と定義する．上記の式(2.20)から式(2.22)は境界条件や温度依存性を考慮して解く必要があるが，熔融深さが発熱分布の深さ方向スケールと照射時間中に熱が広がる距離スケールにより整理できる点が重要である．具体的には，式(2.21)より，吸収係数 $\alpha(\lambda)$ が発熱分布の深さ方向スケール $1/\alpha(\lambda)$ を与え，式(2.20)における熱拡散率 $\kappa(T) = k(T)/[\rho(T)c_p(T)]$ を用いると，照射時間 τ の間に熱が深さ方向へ広がる距離である熱拡散長は

$$L_{\text{th}} \sim \sqrt{\kappa\tau} \quad (2.23)$$

で見積もられる．したがって短パルス照射では，吸収長が大きい場合でも，熔融に寄与する温度上昇は主としてこの熱拡散長の範囲で形成されやすく，熔融深さは数 μm から十数 μm 程度に制限される．

最後に，ドーピング層の深さと濃度を分けて整理する．ドーピング層の深さは熔融深さ h_{melt} を上限とする一方，熔融層内でドーパントが移動できる距離は，熔融時間 t_m と熔融 Si 中の液相拡散係数

第2章 原理

D を用いて

$$L_d \sim 2\sqrt{D_l t_m} \quad (2.24)$$

と近似される．ここで， t_m は温度が融点以上となる継続時間であり，一般的にパルス幅と同程度かそれ以上となり得る．以上より，ドーピング深度は，溶融深さと拡散長のうち小さい方によって概ね決定する．すなわち，溶融層が十分厚くても溶融時間が短い場合には拡散が不十分となり，ドーピング深度は拡散長程度にとどまる．一方，拡散が十分速くても溶融層が浅い場合には，ドーピング深度は溶融深さによって制限される．

2.4 本章の総括

本章では，ピエゾ抵抗型カンチレバーおよび，レーザドーピングに関する基礎的な原理について述べた．まず，ピエゾ抵抗効果の定義と，抵抗変化率，ゲージ率，結晶方位依存性の関係について述べた．次に，ピエゾ抵抗効果を利用した代表的な構造であるピエゾ抵抗型カンチレバーを取り上げ，先端荷重とピエゾ抵抗の抵抗変化率との関係が線形であることを示した．そして，ブリッジ回路とアンプを用いた抵抗変化率の電圧信号への変換原理について述べた．最後に，レーザドーピングの基本的な原理について概説した．

第3章 表面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー

3.1 本章の概要

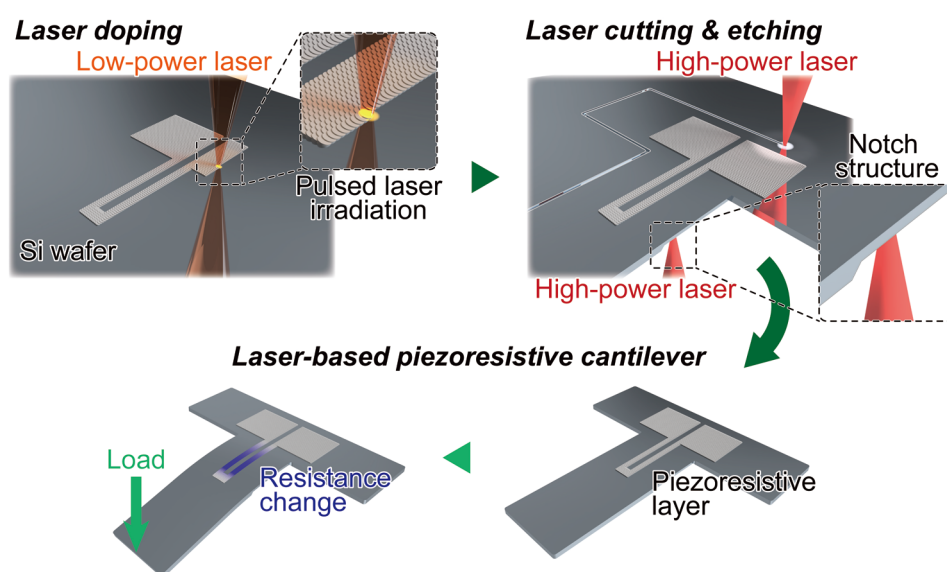


Figure 3.1 表面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー製作手法の概要.

本章では，レーザドーピングを用いた多軸力センサ製作の第一段階として，表面レーザドーピングを利用したデバイス表面へのピエゾ抵抗形成手法を提案し，それを用いて製作したピエゾ抵抗型カンチレバーの基礎特性評価について述べる．本章の目的は，レーザ加工とレーザドーピングを組み合わせた提案手法により，ピエゾ抵抗型 MEMS 力センサが実際に製作可能であることを実証することである．具体的には，以下の観点から提案手法の有効性を評価する．第

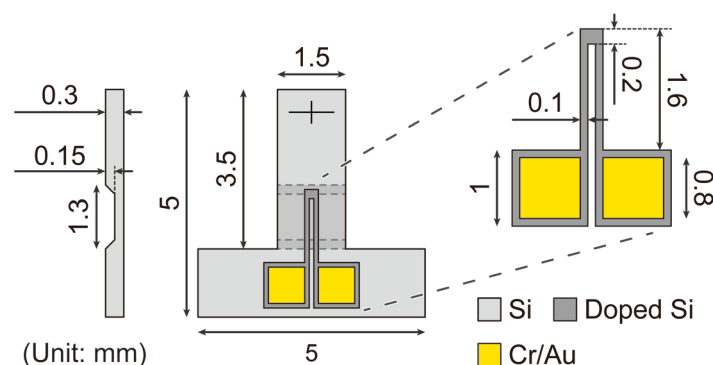


Figure 3.2 製作したカンチレバーの設計.

一に、レーザドーピングによって形成されたピエゾ抵抗層がセンサ素子として十分な感度を有することを示すため、ゲージ率の絶対値が 10 以上となることを確認する。第二に面外方向の力入力に対して相対的に変形が生じやすい構造であるノッチ構造を有するカンチレバー構造が、提案手法によって実現可能であることを確認する。

次節以降では、まず、提案するプロセスの概要及び、製作するカンチレバーの設計について述べる。次に、提案するセンサの製作手法および得られたデバイス形状、並びにピエゾ抵抗層の結晶性評価およびドーパ濃度分布の評価について述べる。最後に、ピエゾ抵抗層の電気的特性、センサの機械特性および応答特性について評価する。

3.2 プロセス概要および設計

3.2.1 提案するプロセスの概要

Figure 3.1 に本章で提案する表面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー製作のコンセプトを示す。まず、ドーパント源がコートされた Si ウエハに対して、低出力レーザ照射によるレーザドーピングによってピエゾ抵抗層を形成する。その後、高出力レーザ照射によるカンチレバー形状への切断と、裏面からのレーザエッチングによるノッチ構造の形成によって、デバイス形状を製作する。このように、レーザ照射条件を切り替えることで、同一のレーザ加工装置のみで、センサ素子形成とセンサ構造形成をシンプルな手法で一括で製作することが可能である。また、センサ素子形成とセンサ構造形成を同一装置内で連続的に行うことで、形成されるピエゾ抵抗層はセンサ構造に対して位置ずれなく配置される。さらに、レーザ照射条件を適切に調整することで、逆テーパを有するノッチ構造などの 2.5 次元的な形状加工も可

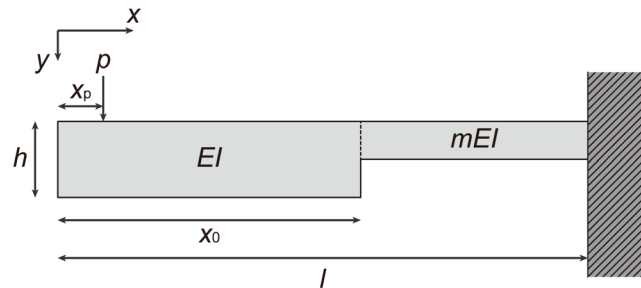


Figure 3.3 ばね定数算出のためのモデル化したカンチレバー構造.

能である．このように，本手法は高い設計自由度を有する製作手法であり，Si ウエハ表面にのみピエゾ抵抗層を形成した 2.5 次元構造デバイスの製作に有用である．

3.2.2 設計

Figure 3.2 に，本章で提案する表面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバーの設計を示す．本章ではレーザドーピングによってピエゾ抵抗型カンチレバーが製作可能かどうか検証することを目的としている．そのため，カンチレバー構造とピエゾ抵抗層の寸法は，安定して製作可能な値とした．センサチップは厚さ $300\ \mu\text{m}$ の T 字型構造をしており，表面にピエゾ抵抗層，裏面のカンチレバー根元にノッチ構造が形成されている．この時，センサチップの厚みは，材料となる 2 インチの Si ウエハの標準的な厚みである $300\ \mu\text{m}$ とした．ノッチ構造の深さは $150\ \mu\text{m}$ であり，両端の傾斜角は 45° である．カンチレバー部の長さは $3.5\ \text{mm}$ ，幅は $1.5\ \text{mm}$ ，一方，固定部の長さは $1.5\ \text{mm}$ ，幅は $5\ \text{mm}$ である．ピエゾ抵抗層は左右のひずみ検出領域とそれをつなぐ接続部によって U 字型をしており，ひずみ検出領域と接続部の寸法はそれぞれ，幅 $0.1\ \text{mm}$ ，長さ $1.6\ \text{mm}$ と幅 $0.1\ \text{mm}$ ，長さ $0.2\ \text{mm}$ である．ひずみ検出領域の両端には電極層を形成するための $1\ \text{mm} \times 1\ \text{mm}$ の電極パッド領域が設け，その上に $0.8\ \text{mm} \times 0.8\ \text{mm}$ の Cr/Au 薄膜を蒸着して電極とした．また，カンチレバー先端から， $0.5\ \text{mm}$ 内側の位置に，変位印加位置を示す十字マークを形成した．また，カンチレバーの表面を Si ウエハの (100) 面，長手方向を Si ウエハの $\langle 110 \rangle$ 方向に一致するようにした．一般的に (100) 面上に形成された n 型のピエゾ抵抗層は， $\langle 100 \rangle$ 方向の方が $\langle 110 \rangle$ 方向に比べて 3 倍程度高いゲージ率を示す．しかし， $\langle 110 \rangle$ 方向を選択した場合，得られたゲージ率の低下がレーザドーピングに起因するものか，結晶方位によるものか判別が困難となる． $\langle 110 \rangle$ 方向を選ぶことで，レーザドーピングそのものの影響を明確に評価できるようにした．

次に，本章で提案するカンチレバー構造の，集中荷重作用時の変位を導出した．Figure 3.3 に，

 第3章 表面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー

提案するセンサを2段の太さを持つ片持ち梁としてモデル化したイラストを示す．図に示すように梁の自由端を原点とし，梁の長さ方向を座標 x ，梁の全長を l ，自由端から距離 x_0 の位置で梁の断面積が変わると定義した．自由端から距離 x_0 までの断面二次モーメントを I_z ， x_0 から固定端までの断面二次モーメントを mI_z とし，梁のヤング率を E とする．この時，距離 x_p ($0 < x_p < x_0$) の位置に下向きの集中荷重 P を加えた場合の変位 $y(x_p)$ を求める．荷重点より，自由端側の区間 $0 \leq x < x_p$ では曲げモーメントは発生しないため，曲げモーメントは $M(x)$ は，

$$M(x) = 0 \quad (3.1)$$

である．一方，荷重点より固定端側の区間 $x_p \leq x < l$ では，曲げモーメントは次式で表される．

$$M(x) = p(x - x_p) \quad (3.2)$$

次に，荷重点 $x = x_p$ に単位荷重 1 を仮想的に作用させた梁の曲げモーメントは次式で表される．

$$\bar{M}(x) = \begin{cases} 0 & (0 \leq x < x_p) \\ x - x_p & (x_p \leq x < l) \end{cases} \quad (3.3)$$

よって，荷重点の変位は $y(x_p)$ は，単位荷重法より以下のように表される．

$$y(x_p) = \int_0^l \frac{M(x)\bar{M}(x)}{EI_z(x)} dx \quad (3.4)$$

区間によって，曲げモーメントと断面二次モーメントが異なるため，式(3.4)は以下のように表される．

$$y(x_p) = \int_{x_p}^{x_0} \frac{p(x - x_p)^2}{EI_z} dx + \int_{x_0}^l \frac{p(x - x_p)^2}{mEI_z} dx \quad (3.5)$$

上式を積分すると，荷重点の変位は以下のように表される．

$$y(x_p) = \frac{p}{3mEI} (m(x_0 - x_p)^3 + (l - x_p)^3 - (x_0 - x_p)^3) \quad (3.6)$$

また，断面二次モーメント I_z は，区間 $0 \leq x < x_0$ における，梁の幅を b ，厚み h とした場合，以下のように表される．

$$I_z = \frac{bh^3}{12} \quad (3.7)$$

よって，式(3.6)は最終的に以下のように表される．

$$y(x_p) = \frac{4p}{mEbh^3} (m(x_0 - x_p)^3 + (l - x_p)^3 - (x_0 - x_p)^3) \quad (3.8)$$

センサの設計より， $b = 1.5 \text{ mm}$ ， $h = 0.3 \text{ mm}$ ， $x_p = 0.5 \text{ mm}$ ， $l = 3.5 \text{ mm}$ となる．また，単純のた

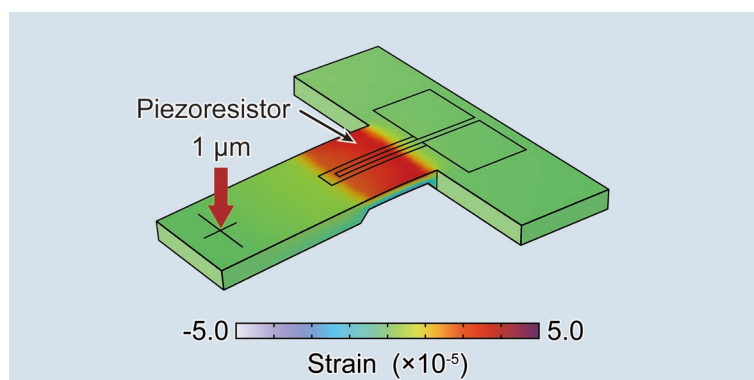


Figure 3.4 入力変位に対するひずみ分布のシミュレーション。

め逆テーパの有るノッチ構造を，長さ 1.15 mm の矩形の段差と仮定すると， $x_0 = 2.35$ mm となる．また，ノッチ構造の深さが，梁の厚みの半分であるため， $m = 1/8$ となる．Si のヤング率は $\langle 110 \rangle$ 方向の $E = 169$ GPa を採用し， $p = 1$ N を印加したと仮定すると，荷重点の変位は $y(x_p)$ は，約 100 μm と概算される．このことより，提案したカンチレバーのばね定数は約 9.97 N/mm と概算される．

3.2.3 シミュレーション

本章で提案するセンサ構造の機械的特性を評価するために，有限要素法(Finite element method : FEM)を用いて変位に対するひずみ分布のシミュレーションを行った(COMSOL Multiphysics 6.3, COMSOL). モデルにはヤング率およびポアソン比の方向依存性を考慮した単結晶 Si を使い，カンチレバーの表面を(100)面に，カンチレバーの長手方向を $\langle 110 \rangle$ 方向のに一致させた．この時，Si の密度は，2330 kg/m³とした．FEM モデルは，設計寸法に基づいて作成し，配線層および piezo 抵抗層の厚みや物性の変化は無視した．また，カンチレバーの固定部の裏面を固定拘束を与えた．Figure 3.4 に，カンチレバー先端の十字マークの中心に 1 μm の変位を与えた際のひずみ分布のシミュレーション結果を示す．ひずみのカラーマップにおいて，赤は引張ひずみ，青は圧縮ひずみを示す．ノッチ構造を用いることで，piezo 抵抗層のひずみ検出領域にひずみが集中することが確認された．piezo 抵抗層ひずみ検出領域におけるカンチレバー長手方向の平均表面ひずみは 1.94×10^{-5} であった．また，1 μm の変位を生じさせるために必要な力は， 1.08×10^{-2} N であった．そのため，シミュレーションから概算されたカンチレバー構造のばね定数は 10.8 N/mm であり，設計より概算した値と概ね同じ値を示した．シミュレーションの結果が実測値よりも大きなばね定数を示した理由はノッチ構造のモデル化の違いによるものと考えられる．FEM モデルは，ノッチ両端に存在する逆テーパ形状によって剛性が高

 第 3 章 表面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー

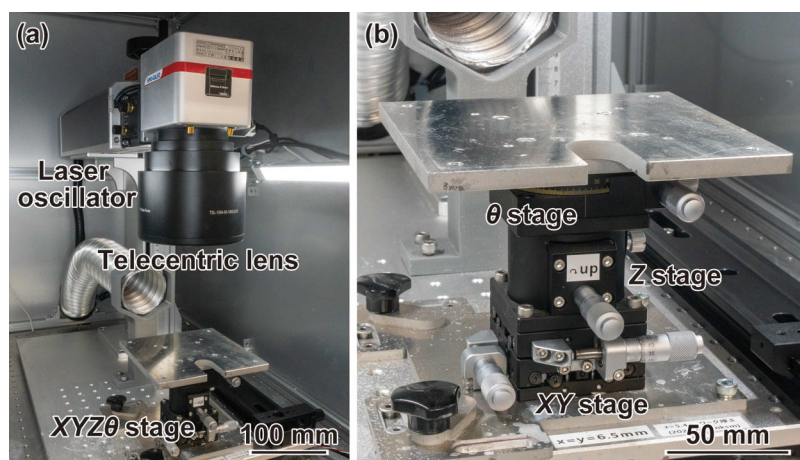


Figure 3.5 使用したレーザ加工機の写真. (a) レーザ加工機全体. (b) 特注チャンバ等を固定するための四軸精密ステージ.

くなり，結果としてばね定数が増加すると考えられる．

同様に FEM シミュレーションにおいて，カンチレバーの固有振動特性を評価した．シミュレーション結果から，カンチレバーは第一次共振モードにおいて面外方向に振動し，その共振周波数は 12119 Hz であった．

3.3 製作

3.3.1 使用したレーザ加工機

本研究でセンサ製作に使用したレーザ加工機について説明する．すべてのセンサ製作には，Figure 3.5(a)に示した市販のパルスファイバレーザ加工機(FIBER-PROF-001, Profitet Co., Ltd.)を用いた．本装置は，光ファイバを増幅媒体とする波長 1064 nm，パルス幅 350 ns のレーザ加工システムであり，偏光方向はランダム偏光である．使用した波長は，単結晶 Si において光の吸収から透過へと遷移する領域に位置する近赤外域の波長であり，レーザの透過長は 900 μm 程度である．したがって，厚さが数 100 μm オーダの Si ウエハの切断加工や深さ数 μm 程度の深いドーピングが可能となる．また，レーザパルスは，サブ μs 領域に属する比較的長いパルスである．この時間スケールは，単結晶 Si を融解し，不純物原子を拡散させるのに十分である．ビーム走査にはガルバノスキャナが用いられており，任意のパターン形状に沿ってレーザを高速に走査できる．スキャナには，焦点距離 100 mm，加工エリアが 50 mm $\times$ 50 mm のテレセントリ

 第 3 章 表面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー

Table 3.1 レーザ加工機の仕様.

λ	Wavelength [nm]	1064
Q	Pulse width [ns]	350
f_{rep}	Frequency [Hz]	$\leq 4\text{M}$
P_{avg}	Average power [W]	≤ 30
f_{lens}	Focal length [mm]	100
v	Scan speed [mm/s]	≤ 2500
M^2	Beam quality	1.4
w_{lens}	Beam radius at lens [mm]	3.5
w_0	Beam waist radius [μm]	13.5
z_R	Rayleigh length [μm]	387

ック $F\theta$ レンズが取り付けられている. 通常の $F\theta$ レンズと比較し, レーザビームがワークに対して垂直に入射するため, 焦点深度が一定となり加工精度が向上する.

Table 3.1 に使用したレーザ加工機の仕様とそれに該当する記号を示す. 使用したレーザはパルス幅が 350 ns のナノ秒レーザであり, 周波数とパワー, 走査速度を変更することができる. フォーカス位置でのスポット半径は, 以下の式から算出した[78].

$$w_0 = \frac{\lambda M^2 f_{\text{lens}}}{\pi w_{\text{lens}}} \quad (3.9)$$

また, 焦点深度の指標であるレイリー長は, 以下の式より算出した.

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda M^2} \quad (3.10)$$

レーザ加工やレーザドーピングの際は, 周波数, パワー, 走査速度とデフォーカス量を調整して探索した適切なパラメータを用いて加工した.

レーザ加工機のレンズの下には, $xyz\theta$ 方向に駆動する精密四軸ステージ(TSD-605S, KSP-606M, SIGMAKOKI Co., Ltd.)が固定されている(Figure 3.5(b)). xyz 方向にはそれぞれ 10 μm の最小移動量で, ± 6.5 mm 移動し, θ 方向は 360°回転することができる. このステージの上に, Si ウエハの加工やレーザドーピングの際に使用する特注のチャンバを固定して使用する. 精密ステージの z 軸方向の移動によって, レンズとウエハのワーキングディスタンスを調整する. また, $xy\theta$ 方向の移動によって, ウエハとレーザ加工位置と角度のアライメントを行う.

 第3章 表面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー

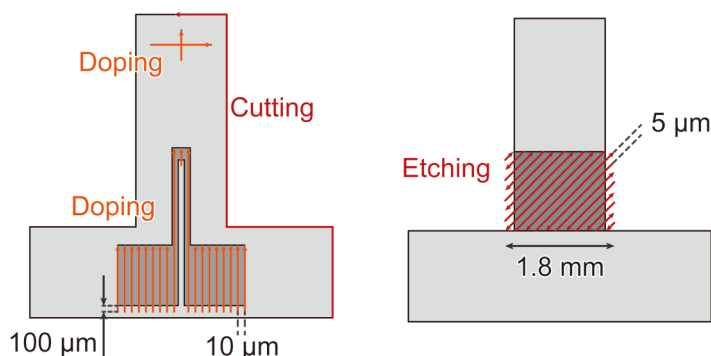


Figure 3.6 センサ構造体製作時のレーザ照射条件.

Table 3.2 各プロセスにおけるレーザ照射条件.

Process	Average power [W]	Frequency [Hz]	Scan speed [mm/s]	Scan number [-]	Atmosphere
Doping	0.9	20k	120	1	N ₂
Cutting	30	20k	60	30	Air
Etching	24	25k	500	4	Air

3.3.2 レーザ照射条件

表面ドーピングカンチレバーの製作に使用したレーザ照射条件について説明する. Figure 3.6 にレーザ照射条件の模式図を, Table 3.2 に各プロセスのレーザ照射条件を示す. レーザドーピングおよびバックサイドエッチングには, 面全体を等間隔に走査するラスタスキャン方式を用い, カンチレバー形状の切り出しには, 外周に沿って走査するベクタスキャン方式を用いた. レーザドーピング時は, 平均出力 0.9 W, 繰り返し周波数 20 kHz, 走査速度 120 mm/s でレーザを照射した. 走査は, ピエゾ抵抗層の下端から上端に向かって一方向に 1 回走査し, その走査間隔は 10 μm であった. カンチレバー先端の十字マークは, レーザドーピングと同じ条件で, 1 回ずつレーザを照射することで形成した. カンチレバーの切断は, 平均出力 30 W, 繰り返し周波数 20 kHz, 走査速度 60 mm/s で行い, カンチレバー外周に沿って反時計回りに 30 回走査した. バックサイドエッチングは, 平均出力 24 W, 繰り返し周波数 25 kHz, 走査速度 500 mm/s で行った. 走査はカンチレバー長手方向を 0°とした場合, 45°と-45°の各方向に 2 回ずつ往復するように照射し, 走査間隔は 5 μm とした. カンチレバー加工時のレーザ照射は, 設計値と同じ寸法で行った. 一方, ピエゾ抵抗層形成時には, レーザのオンディレイによりガルバノスキャナが

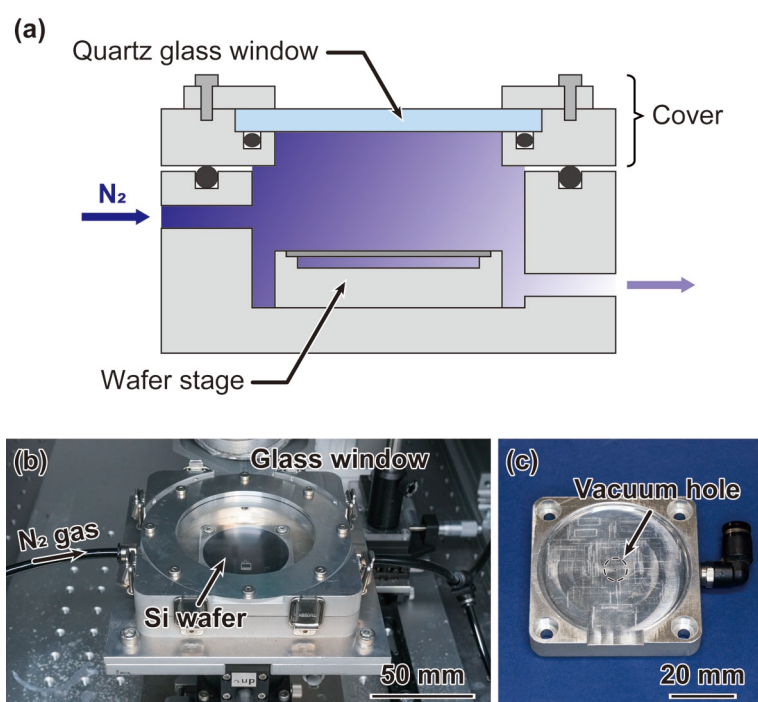


Figure 3.7 レーザドーピングに利用した特注チャンバ. (a) 特注チャンバの模式図. (b) チャンバ全体の写真. (c) ウエハステージの写真.

動き、照射開始される地点から約 $100\ \mu\text{m}$ 分レーザが照射されないため、電極パッド領域下端および横方向のひずみ検知領域下端を設計値より $100\ \mu\text{m}$ 拡張し、その領域に照射した。バックサイドエッチングではアライメント誤差を考慮し、溝領域の設計値よりも幅が広い $1.8\ \text{mm} \times 1.3\ \text{mm}$ の範囲にレーザを照射した。

次に、表面ドーピングカンチレバー製作に使用した特注チャンバについて説明する。Figure 3.7(a)に、チャンバの模式図を示す。チャンバは、窒素雰囲気下でレーザドーピングをするために用いた。チャンバの蓋を締めた状態で窒素ガスを循環させることで、簡易的に窒素雰囲気を作り出すことができる。チャンバ内部には Si ウエハを固定するためのステージがあり、その上の部分に、ウエハ表面へレーザを照射するための窓がある。窓には、赤外線の透過率が高い石英ガラスを用いた。窓やチャンバの蓋を締める部分には O リングを用い、気密性が上がるようにした。窓は直径 $80\ \text{mm}$ 、厚さは $2\ \text{mm}$ であり、窓の下部とウエハ表面の距離が $12\ \text{mm}$ になるよう設計されている。Figure 3.7(b)に実際のチャンバの写真を示す。チャンバのパーツはアルミの削り出しによって製作した。また、チューブを接続して窒素ガスを循環させている。Figure 3.7(c)にチャンバ内部のウエハを固定するためのステージの写真を示す。ウエハの直径分の溝が形成されており、ここにウエハを固定する。また、ステージ中央には直径 $0.5\ \text{mm}$ の穴が形成されて

 第3章 表面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー

いる。この穴はチューブを介して小型の真空ポンプ(DAP-6D, ULVAC Inc.)に接続されており、バックサイドエッチングの際に切り出したチップを吸引して固定するために使用する。カンチレバーの切断及びバックサイドエッチングは、チャンバの蓋を開け大気中で行った。レーザドーピングの際には、カンチレバー表面より 0.1 mm だけ上方にデフォーカスした位置にレーザを照射し、カンチレバーの切断とバックサイドエッチングの際には、ウエハの厚み方向の中心にフォーカスしてレーザを照射した。これらの照射条件に基づき、プロセス条件の指標とするためレーザの平均出力密度とフルエンスを概算した。レーザビームの光軸方向を z' 軸とし、 $z'=0$ を焦点位置、正の方向を試料側、負の方向をレンズ側と定義する。焦点から離れた位置をデフォーカス位置と呼び、その位置におけるビーム半径を $w(z')$ と定義する。デフォーカス位置におけるビーム半径 $w(z')$ は、レイリー長 z_R と焦点位置におけるウエスト半径 w_0 を用いて次式で表される。

$$w(z') = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z'}{z_R}\right)^2} \quad (3.11)$$

よって、単位面積当たりの平均出力である平均出力密度のデフォーカス位置 z' における値 $I(z')$ は次式で表される。

$$I(z') = \frac{2P_{\text{avg}}}{\pi w(z')^2} \quad (3.12)$$

また、同様に、単位面積あたりのパルスエネルギーであるフルエンスの、デフォーカス位置 z' における値 $F(z')$ は次式で表される。

$$F(z') = \frac{I(z')}{f_{\text{rep}}} \quad (3.13)$$

一方、レーザドーピングをチャンバ内で行い、レーザビームがガラス窓を通過して試料に照射される場合には、ガラス窓による反射損失および吸収減衰を考慮する必要がある。レーザビームがテレセントリックレンズによってガラス窓に垂直に入射すると仮定すると、表面反射率 R_{surf} は垂直入射に対する Fresnel の式より次式で与えられる。

$$R_{\text{surf}} = \left(\frac{n_{\text{air}} - n_{\text{glass}}}{n_{\text{air}} + n_{\text{glass}}} \right)^2 \quad (3.14)$$

ここで、 n_{air} および n_{glass} はそれぞれ、大気およびガラスの屈折率である。したがって、界面 1 面あたりの透過率 T_{surf} は次式で表される。

$$T_{\text{surf}} = 1 - R_{\text{surf}} \quad (3.15)$$

第 3 章 表面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー

Table 3.3 各工程におけるスポット半径，平均出力密度およびフルエンス．

Process	Spot radius [μm]	Average power density [MW/cm^2]	Fluence [J/cm^2]
Laser cutting	13.5 – 14.5	9.05 – 10.4	452 – 520
Backside etching	13.5 – 14.5	7.24 – 8.33	290 – 333
Laser doping	14.0	0.273	13.7

さらに，厚さ h_{glass} のガラス中を透過する際の透過率 T_{glass} は，Beer–Lambert の法則により次式で与えられる．ここで， α_{glass} はガラスの吸収係数である．

$$T_{\text{glass}} = e^{-\alpha_{\text{glass}} h_{\text{glass}}} \quad (3.16)$$

よって，ガラス窓を通過する際のエネルギーの全透過率 T_{total} は次式で表される．ここで，チャンバ内を満たす窒素ガスと大気の屈折率は同一と仮定し，ガラスの界面を 2 回通過することを考慮している．

$$T_{\text{total}} = T_{\text{surf}}^2 T_{\text{glass}} \quad (3.17)$$

したがって，ガラス窓を通過した後の平均出力密度 $I_t(z')$ およびフルエンス $F_t(z')$ はそれぞれ，次式で求められる．

$$I_t(z') = I(z') T_{\text{total}} \quad (3.18)$$

$$F_t(z') = F(z') T_{\text{total}} = \frac{I_t(z')}{f_{\text{rep}}} \quad (3.19)$$

レーザ切断時には，デフォーカス位置 z' は -0.15 mm から 0.15 mm の範囲で変動し，バックサイドエッチング時にはデフォーカス位置 z' は -0.15 mm から 0 mm の範囲で変動する．また，レーザドーピング時にはデフォーカス位置 z' は -0.1 mm となる．Figure 3.6 に示したレーザ照射パラメータ及び，石英ガラスの屈折率と吸収係数をそれぞれ， $n_{\text{glass}} = 1.45$ [79]， $\alpha_{\text{glass}} = 4 \times 10^{-6} / \text{cm}$ [80] とした場合，石英ガラスの透過率 T_{total} は 93.4% となり，各加工工程における平均出力密度とフルエンスは Table 3.3 の通りになる．レーザ切断時のパルスエネルギーはレーザエッチングの 2 倍程度あり，レーザドーピングの 30 倍程度である．

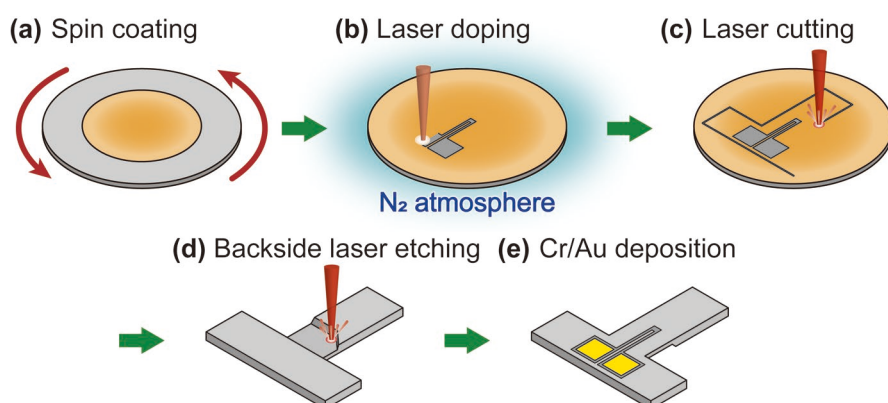


Figure 3.8 提案するセンサチップの製作プロセス. (a) SOD の塗布. (b) 表面レーザドーピングによる piezo 抵抗層の形成. (c) Si ウエハからセンサ構造体の切り出し. (d) バックサイドエッチングによるノッチ構造の形成. (e) 蒸着による Cr/Au 電極の形成.

3.3.3 製作プロセス

Figure 3.8 に、提案する piezo 抵抗型カンチレバーのセンサチップの製作プロセスを示す. センサの基板材料には、厚さ 300 μm 、比抵抗 1-20 $\Omega \cdot \text{cm}$ の B がドーピングされた p 型の片面鏡面研磨の Si ウエハ(Matsuzaki Seisakusyo Co., Ltd.)を用いた. まず、Si ウエハ表面の自然酸化膜を 3% フッ酸(HF)によって除去した後、P を含む SOD(OCD T-1 P-59230, Tokyo Ohka Kogyo Co., Ltd.)をドーパント源としてスピコートした(Figure 3.8(a)). スピコートは 500 rpm で 5 s、続いて 3000 rpm で 30 s の 2 段階で行い、その後、有機溶媒を揮発させ被膜を焼成するために 250°C で 15 min ベークした. 被膜は吸湿性が高いため、プロセスおよびその後のウエハ保管は、湿度 40% 未満の環境下で行った. 次に、レーザドーピングによって piezo 抵抗層を形成した(Figure 3.8(b)). レーザ加工に使用したレーザ加工装置、チャンバおよびレーザ照射条件は、それぞれ 3.3.1 節および 3.3.2 節で述べたとおりである. ウエハステージにウエハを固定した状態でチャンバの蓋を閉じ、窒素ガスを十分に充填させた後にレーザを照射した. 窒素ガスはレーザ照射中も循環させた. その後、ウエハから piezo 抵抗層が形成されたセンサ構造体を切り出した(Figure 3.8(c)). レーザ切断時には、チャンバの蓋を開け、大気中で加工を行った. この時、加工データ上でカンチレバー構造と piezo 抵抗層の位置があらかじめ整合されているため、ウエハや精密ステージを動かさなければ、カンチレバー構造に対して piezo 抵抗層が自動的にアライメントされる. 続いて、センサチップを裏返し、ノッチ構造を加工した(Figure 3.8(d)). レーザ加工装置は、精密ステージの原点とレンズ中心の位置が一致するように調整されている. また、ウエハステー

 第 3 章 表面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー

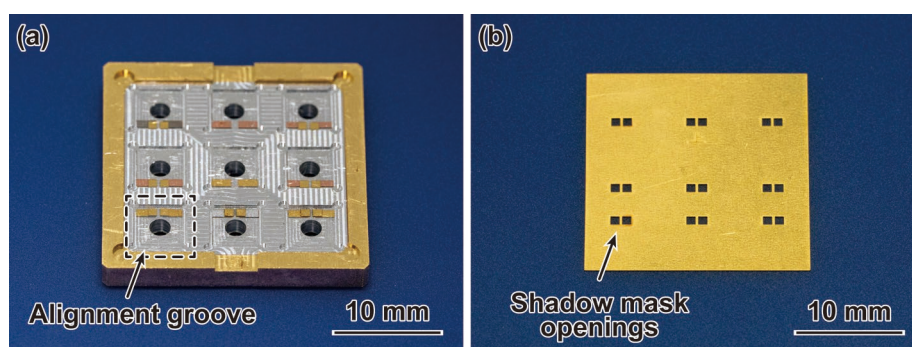


Figure 3.9 蒸着時に使用した治具の写真. (a) センサ構造体を整列するための治具. (b) Ti 製のシャドウマスク.

ジの中心と精密ステージの中心は一致するように設置されている. そのため, 精密ステージを原点位置に移動させ, ウエハステージの中央にセンサ構造体を配置すると, レンズとセンサ構造体が正確にアライメントされる. 加工時には, 治具を用いてセンサ構造体をウエハステージ中央に設置し, 吸引することで動かないように固定した状態で加工を行った. これら一連のレーザ加工工程は数十秒以内で完了した. その後, ウエハ表面に残留した SOD 層およびレーザドーピングによって形成された酸化膜を除去するため, 30 %HF で表面を洗浄した. 最後に, 真空蒸着装置(VE-2012-KO, Vacuum Device Inc.)を用いて電極を形成した(Figure 3.8(e)). ピエゾ抵抗層の電極パッド領域の内側に正確に電極を形成するため, シャドウマスクと, 治具を利用した. それらの写真を Figure 3.9 に示す. HF 洗浄後のセンサ構造体を治具中の窪みに整列させ, その上からシャドウマスクを被せて蒸着することで, 9 個のセンサ構造体に同時に電極を形成することができる. シャドウマスクは, 厚さ 100 μm の Ti 板をファイバレーザ加工機で切り出して製作した. Ti 板切断のレーザ照射条件は, 平均出力 24 W, 繰り返し周波数 20 kHz, 走査速度 200 mm/s, 走査回数 5 回であった. また, 電極は, まず約 50 nm の Cr を密着層として, 続いて約 200 nm の Au を導電層として蒸着した. 最後に, 製作したセンサチップを接着剤(Quick 5, Konishi Co., Ltd.)でプリント基板(Printed circuit board : PCB)上に固定し, ボールボンダ(53xxBDA, F&S BONDTEC)を用いた直径 50 μm の Au 線によるワイヤボンディングで電極と PCB を接続した. 使用した PCB は, 提案するセンサチップ用に特注したものである. この時, Au 線をボンディングできるよう, PCB の電極表面には製作段階で無電解金メッキを施した.

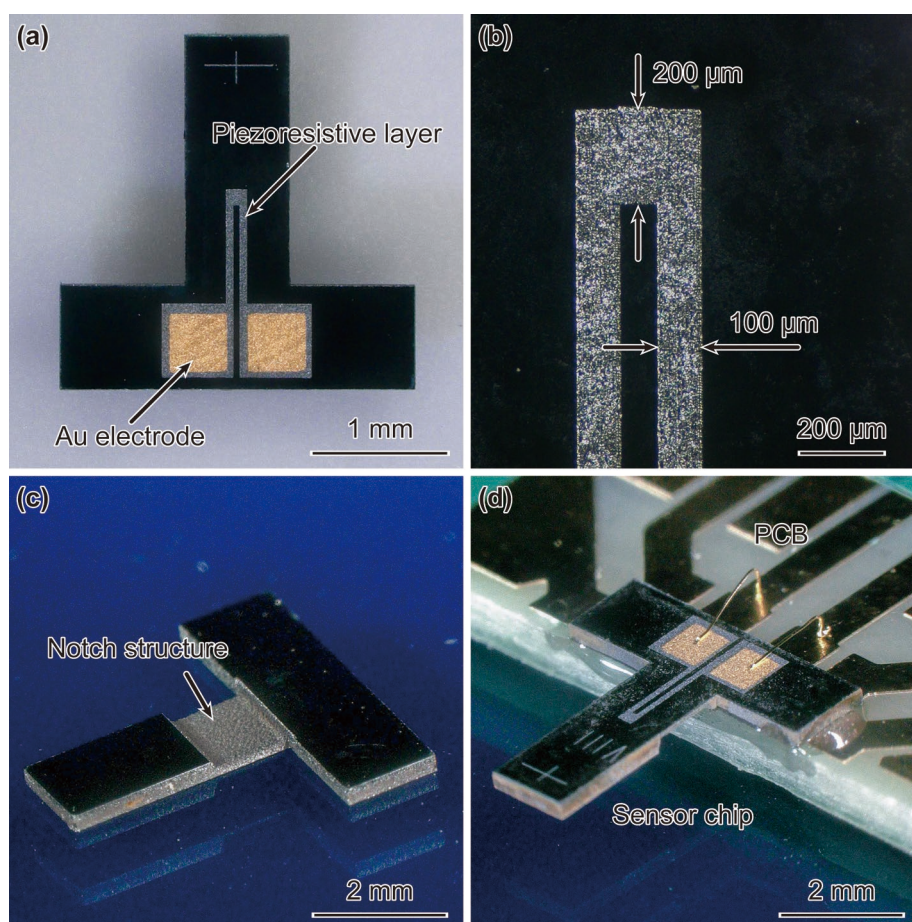


Figure 3.10 製作したピエゾ抵抗型カンチレバーの顕微鏡写真. (a) センサチップ表面. (b) ピエゾ抵抗層ひずみ検知部の拡大写真. (c) センサチップ裏面. (d) PCB 上に実装されたセンサチップ.

3.3.4 製作したセンサの構造評価

Figure 3.10 に製作したピエゾ抵抗型カンチレバーの顕微鏡写真を示す. 写真はデジタルマイクロスコープ(VHX-6000, Keyence Corp.)を用いて撮影した. Figure 3.10(a)にセンサチップの表面を示す. ピエゾ抵抗層がカンチレバー構造に対して正確にアライメントされて形成されていることが確認できる. また, 電極もピエゾ抵抗層の電極パッド領域内に精度良く形成されていることが分かる. デバイスの外形寸法は, 5.03 mm×5.03 mm であり, 概ね設計寸法通りに製作できていることが確認された. Figure 3.10(b)はピエゾ抵抗層の拡大画像であり, U 字型のひずみ検出領域が確認できる. ピエゾ抵抗層表面には微細な凹凸があり, 肉眼では白色に, 顕微鏡下

第3章 表面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー

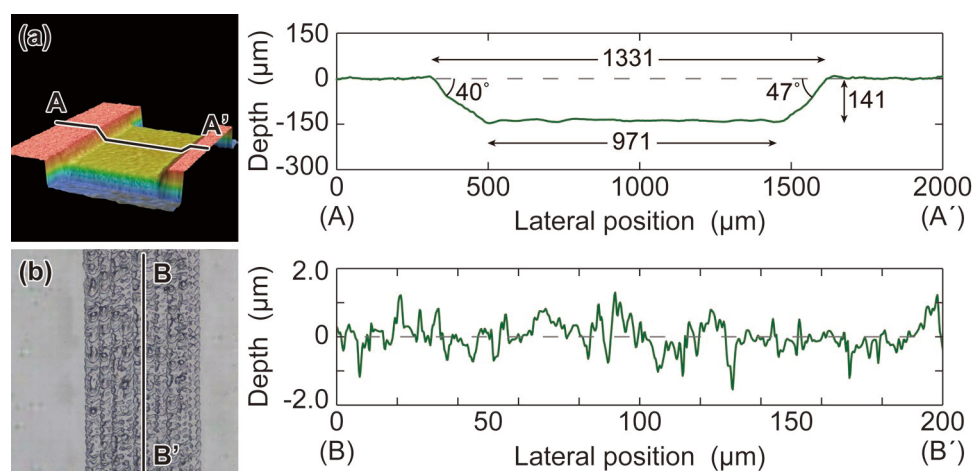


Figure 3.11 製作したセンサの表面プロファイル. (a) ノッチ構造. (b) ピエゾ抵抗層表面.

では灰色を示した. この時, ピエゾ抵抗層の幅寸法は約 $100\ \mu\text{m}$ であり, 接続部の幅も $200\ \mu\text{m}$ であり, いずれも設計値と一致していることを確認した. Figure 3.10(c)にはセンサチップ裏面の写真を示す. ノッチ構造はカンチレバーの根元にアライメントされており, 溝の両端が逆テーパ状になっていることも確認できる. 最後に, Figure 3.10(d)に, PCB 上にボンディングしたセンサチップの写真を示す. Au 線がピエゾ抵抗層上の Au 電極に接続されており, 剥離などもなく固定されていることを確認した.

Figure 3.11 にノッチ構造とピエゾ抵抗層の表面プロファイルを示す. これらの表面プロファイルは共焦点レーザ顕微鏡(VK-X1000, Keyence Corp.)を用いて取得した. Figure 3.11(a)にはノッチ構造の表面プロファイルを示す. ノッチ構造の表面プロファイルは点 A から A'までの $2000\ \mu\text{m}$ の線に沿って測定された. 溝の深さは $141\ \mu\text{m}$ であり, カンチレバーの根元側の傾斜角は 40° , 先端側の傾斜角は 47° であった. また, ノッチ底部と上部の長さはそれぞれ, 約 $1330\ \mu\text{m}$ と $970\ \mu\text{m}$ であった. 以上のことから, 概ね設計値どおりのノッチ構造が形成できていることを確認した. この時, ノッチ底部の算術平均粗さ R_a は $2.3\ \mu\text{m}$ であり, 最大高さ粗さ R_z は $13\ \mu\text{m}$ であった. このことから, ノッチ部底面はレーザエッチングによる凹凸があることが確認できる. Figure 3.11(b)にはピエゾ抵抗層表面の表面プロファイルを示す. ピエゾ抵抗層の表面プロファイルは点 B から B'までの $200\ \mu\text{m}$ の線に沿って測定した. R_a は $0.38\ \mu\text{m}$ であり, R_z は $2.8\ \mu\text{m}$ であった. このことから, レーザドーピングによって, 平滑だった Si ウエハ表面に大きな凹凸が形成されていることが確認できる.

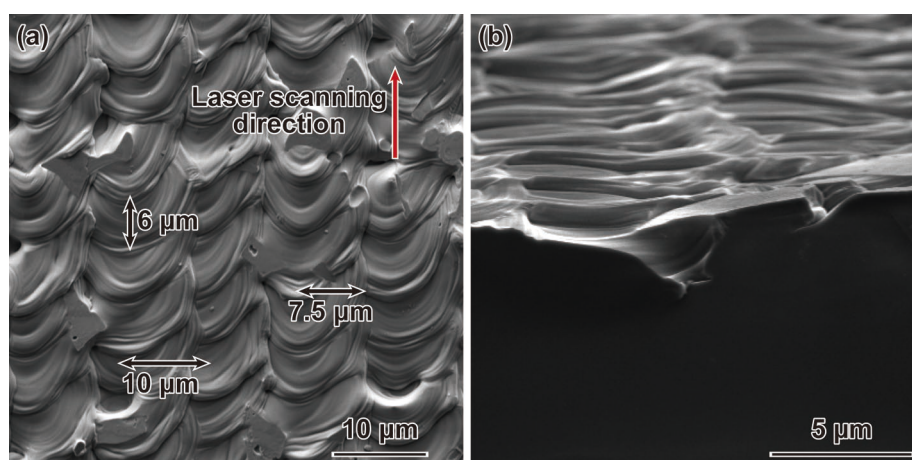


Figure 3.12 ピエゾ抵抗層の SEM 画像. (a) ピエゾ抵抗層表面. (b) ピエゾ抵抗層断面.

Figure 3.12 に、走査電子顕微鏡(Scanning electron microscope : SEM, Inspect F50, FEI Co.)を用いて撮影したピエゾ抵抗層表面と断面の SEM 画像を示す. Figure 3.12(a)より、ピエゾ抵抗層表面にはパルスレーザ照射による、Si ウエハの溶解および凝固に起因する鱗状の模様が確認できた. この時、レーザ走査方向の鱗状の模様の間隔は約 $6\ \mu\text{m}$ 、各列の間隔が $10\ \mu\text{m}$ であった. レーザ照射条件より、走査速度 $120\ \text{mm/s}$ 、繰り返し周波数 $20\ \text{kHz}$ 、走査間隔 $10\ \mu\text{m}$ で走査されるパルスレーザのパルス間距離は約 $6\ \mu\text{m}$ と求められる. よって、1つの鱗状の模様は単一のレーザパルスによって形成されることが確認された. また、模様の直径より単一レーザパルスによる Si の溶解領域の直径は約 $15\ \mu\text{m}$ であると推測された. また、各鱗状模様の外縁部には同心状のコントラストが確認され、その中心部は窪んだ形状をしている. この形状は、熔融 Si 中に生じるマランゴニ対流、特に温度上昇によって表面張力が増加するモデルに基づく流動によって形成されたものと考えられる [81]. パルスレーザ照射によって Si が熔融した場合、照射中心部が最も高温となり、外縁部に向かって温度が低下するため、熔融 Si 中に温度勾配が生じる. 一般的には温度上昇に伴い表面張力は低下するが、熔融表面に酸化物成分が存在する場合や表面の清浄度が低い場合には、温度上昇に伴って表面張力が増加する挙動が報告されている [82]. Si 表面に形成された SOD 膜の影響によって、熔融した Si は温度上昇によって表面張力が大きくなると仮定すると、表層の熔融 Si は外縁部から中心部へ向かって引き寄せられる. 一方で、中心部の熔融 Si は熔融部の底部を経由して外縁部へと向かう循環流を形成する. このようなマランゴニ対流により、外縁部が相対的に盛り上がった状態で再凝固し、それが繰り返されることで、同心円状のコントラストが形成されると考えられる.

また、Figure 3.12(b)に、ピエゾ抵抗層の断面 SEM 画像を示す. 断面観察のため、カンチレバ

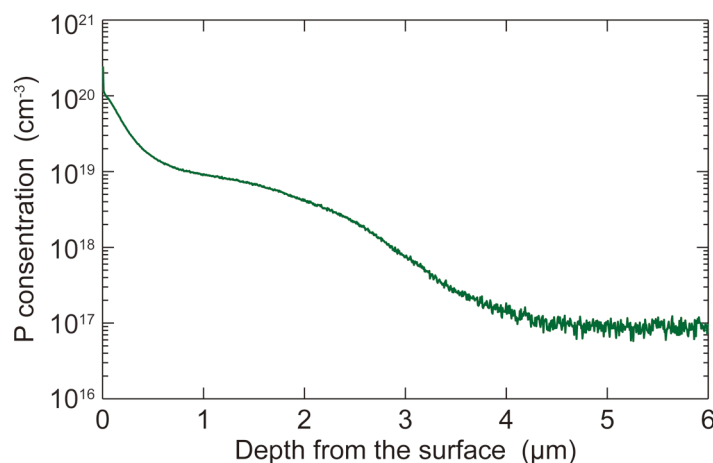


Figure 3.13 piezo 抵抗層の表面からの深さに対する P 濃度のプロファイル.

一根元の裏面にダイヤモンドペンで傷を付け、その部分を起点としてカンチレバーを破断し断面を露出させた。観察の結果、SEM において観察できる寸法のクラックは確認されなかった。

3.3.5 形成した piezo 抵抗層の組成および結晶性評価

次に、表面レーザードーピングによって形成した、piezo 抵抗層の組成および結晶性について評価した。Figure 3.13 に、動的二次イオン質量分析法(Dynamic secondary ion mass spectrometry : D-SIMS)によって測定した、piezo 抵抗層の P 濃度の深さ方向プロファイルを示す。測定には D-SIMS 装置(ADEPT-1010, ULVAC-PHI, Inc.)を使用した。グラフの横軸は piezo 抵抗表面からの深さ、縦軸は単位体積あたりの P 原子の個数を示している。piezo 抵抗層表面付近では、P 濃度が 10^{20} cm^{-3} 以上の高い値を示したが、この領域の値には測定誤差が含まれている可能性がある。濃度は表面から約 $0.5 \mu\text{m}$ 以内で約 10^{19} cm^{-3} まで減少し、それより深い領域では P 濃度が緩やかに減少しつつも、約 $2 \mu\text{m}$ の深さまでは比較的安定していた。その後、濃度はさらに減少し、約 $4.5 \mu\text{m}$ より深い領域ではバックグラウンドレベルに到達し、検出限界となった。以上の結果より、表面から数 μm の領域まで比較的高濃度で P がドーピングされていることが確認された。詳細なドーピング深さに関しては、次節で示す電気的特性の結果と併せて検討する。

続いて、形成した piezo 抵抗層の結晶性を評価した。本章では、局所的な結晶構造や欠陥を評価できるラマン分光法、より広い範囲の結晶構造を解析できる X 線回折法(X-ray diffraction : XRD)、局所的な結晶構造を観察することができる透過型電子顕微鏡(Transmission electron microscope : TEM)の 3 種類の手法を用いて評価した。最初に実施したラマン分光法は、観察対

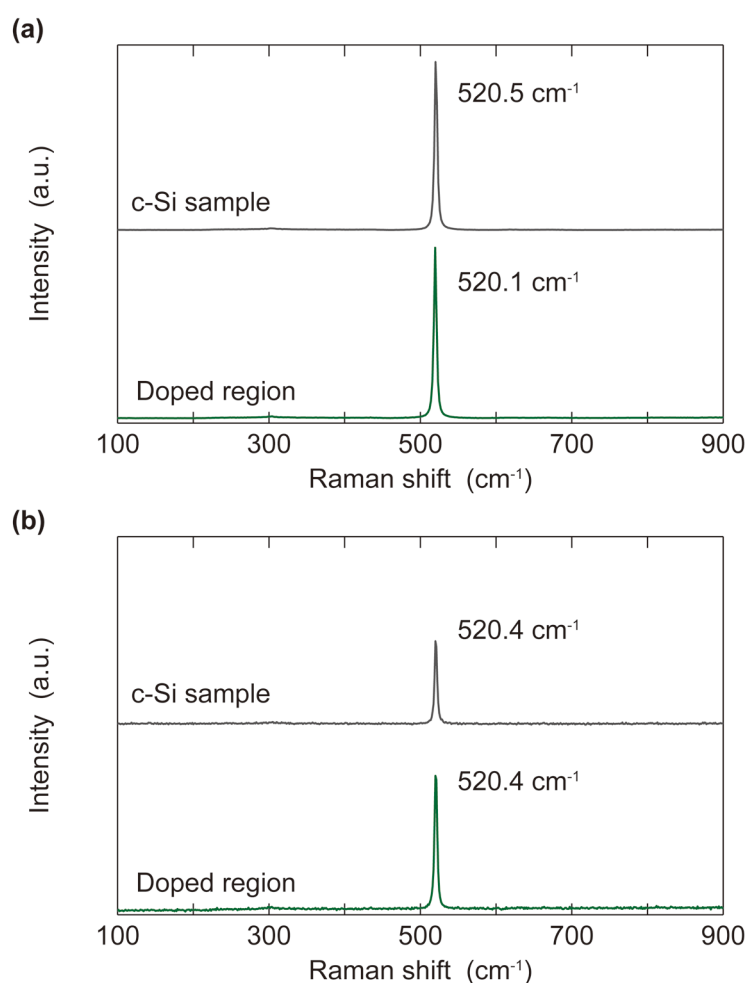


Figure 3.14 ラマンスペクトル. (a) 励起波長 532 nm の場合. (b) 励起波長 633 nm の場合.

各図において灰色の線は単結晶 Si の緑色の線はレーザードーピング領域の測定結果を示す.

象に対して、レーザー光を照射した際に生じるラマン散乱光のスペクトルから、物質の評価を行うことができる。ピークの位置から化学結合の情報が得られ、ピークの半値幅やシフト量から結晶性を評価することができる。また、照射されるレーザー光の励起波長によって試料への侵入深さが異なり、Si の場合、532 nm の励起波長だと 1 μm 程度、633 nm だと 3 μm 程度の深さまで構造解析が可能になる [83]。Figure 3.14 に、ラマン分光装置(InVia confocal Raman microscope, Renishaw plc)を用いて計測した、単結晶 Si サンプルとレーザードーピング領域のラマンスペクトルを示す。Figure 3.14(a)には、励起波長 532 nm におけるラマンスペクトルを示す。単結晶 Si とピエゾ抵抗層のピークの位置と半値幅はそれぞれ、520.5 cm^{-1} , 4.10 cm^{-1} と 520.1 cm^{-1} , 4.15 cm^{-1} になり、顕著な差はみられなかった。同様に励起波長 633 nm におけるラマンスペクトルを Figure

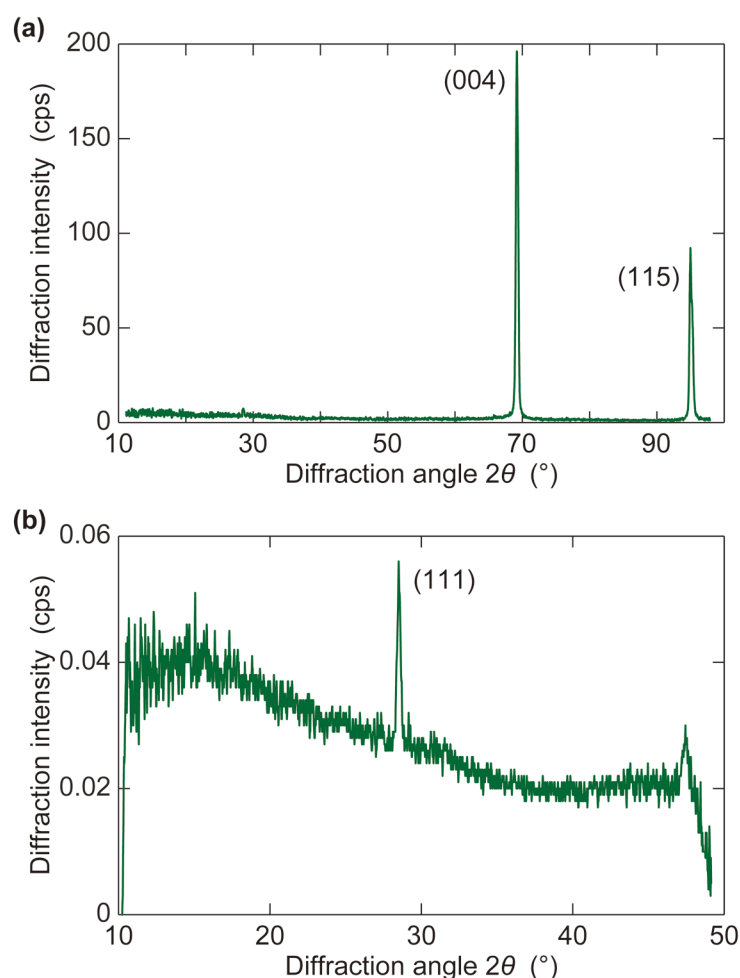


Figure 3.15 XRD スペクトル. (a) 計測したスペクトル全体. (b) $2\theta \approx 30^\circ$ 付近のスペクトル.

3.14(b)に示す. その時のピーク位置と半値幅は, 520.4 cm^{-1} , 3.72 cm^{-1} と 520.4 cm^{-1} , 4.15 cm^{-1} となり, ピエゾ抵抗層においてピークのわずかな広がりが確認されたものの, 結晶性の低下に起因するものかは明確ではなかった. ラマン分光法は測定領域がレーザー光の照射範囲のみと限定的であり, 局所的な構造変化が検出できないため, 本手法のみでは結晶性を評価することは困難であった.

次に, XRD による結晶構造の評価を行った. XRD は試料に入射した X 線の回折角から格子間隔を算出し, 結晶の格子定数や配向を評価する手法である. Figure 3.15(a)に XRD 装置(D8 Discover, Bruker Corp.)で計測した XRD のスペクトルを示す. 本計測ではピエゾ抵抗層が形成された表面, すなわち(100)面を上向きに配置し, X 線を斜入射させて回折強度を取得した. スペクトルより, $2\theta \approx 69^\circ$ および $2\theta \approx 95^\circ$ 付近に明確な回折ピークが確認された. これらに対応す

 第 3 章 表面レーザードーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー

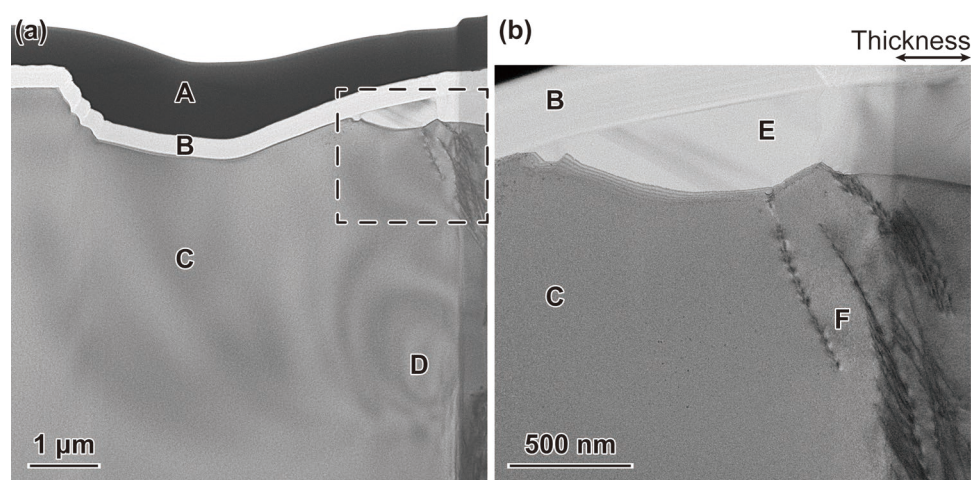


Figure 3.16 ピエゾ抵抗層の断面 TEM 画像. (a) サンプル全体の画像. (b) 点線で囲まれた領域の拡大画像.

る格子面はそれぞれ(004)面および(115)面であり，観察された試料表面が(100)方位の Si 単結晶であることが再確認された．(115)面に対応するピークが観察されたが，装置 X 線照射口と検知部に生じたアライメントの誤差により，(100)配向の結晶面が(115)面として検出されたためであると考えられる．ただし，Si に対する X 線の侵入深さは $10\mu\text{m}$ から $20\mu\text{m}$ 程度であるため，本測定結果は厚さ数 μm 程度と予想されるレーザードーピング層ではなく，その下層のバルク Si 領域が主に観察されていると考えられる．一方， $2\theta \approx 30^\circ$ 付近にわずかなピークが認められたため，この領域を再度詳細に測定した．得られたスペクトルを Figure 3.15(b)に示す．その結果， $2\theta \approx 29^\circ$ 付近に明確な回折ピークが確認された．このピークは一般に Si の(111)面に対応するため，レーザードーピング過程において局所的に(111)配向を持つ再結晶領域が形成され，部分的に多結晶化が生じている可能性が示唆された．

最後に，透過型電子顕微鏡(H-9500, Hitachi High-Tech Corp.)を用いて，ピエゾ抵抗層の断面 TEM 画像を撮影し，結晶構造を観察した．TEM は，試料を透過した電子を結像して観察する手法であり，高い空間分解能を有するため，結晶配向の変化や転位，クラックなどを明瞭に捉えることができる．このため，XRD では平均化されて見えにくい局所的な構造変化を直接評価できる．ピエゾ抵抗層の断面 TEM 画像を Figure 3.16(a)に示す．画像の上部がピエゾ抵抗層の表面に対応している．観察のため，約 $6\mu\text{m} \times 6\mu\text{m}$ の領域を薄膜化して試料を製作した．領域 A および B は薄膜化時に堆積された保護膜，領域 C は P がドーピングされた Si 基板に対応する．また，領域 D を中心として見られる縞状のコントラストは，試料の湾曲によるものである．観察した領域の大部分では，クラックなどは確認されなかった．一方で，画像右上部にはクラックが確

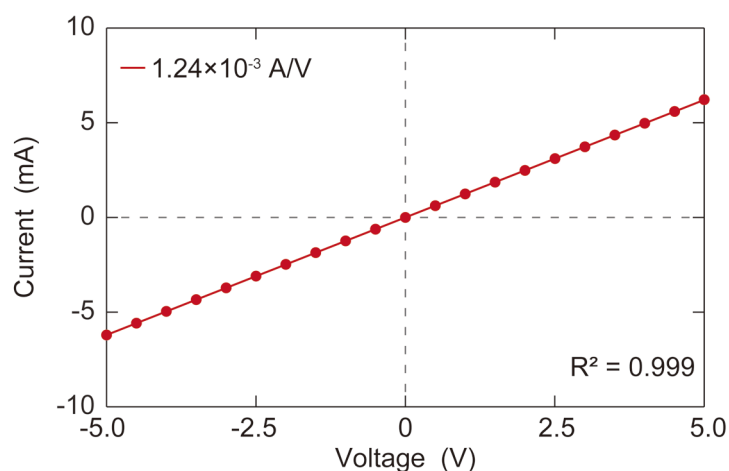


Figure 3.17 形成したピエゾ抵抗層の I-V 特性.

認められ、その拡大図を Figure 3.16(b)に示す。拡大画像の右端は試料厚さ方向の一部が写っている。拡大画像中において、Si 基板とは異なる結晶配向を示す領域 E が、保護膜とベースの Si 基板との間に観察された。TEM コントラストから、この領域は基板と異なる配向を有するものの、この領域内においては結晶方位が比較的整合していると推定される。さらに、領域 F に示すように、ドーパされた Si 基板内部に長さ $0.5\ \mu\text{m}$ 程度のクラックが観察された。

以上の結果より、レーザドーピング領域の大部分はもとの基板由来の(100)配向を維持している一方で、一部には異なる結晶配向を持つ再結晶領域やクラックが存在することが明らかとなった。これらの局所的な配向の乱れは、XRD で検出された(111)成分と一致する結果であり、提案するプロセスにおいてはレーザ溶融および急冷過程に起因する部分的な多結晶化やクラック形成が生じていることが確認された。

3.4 ピエゾ抵抗層の電気的特性評価

3.4.1 電流電圧特性の評価

レーザドーピングによって形成したピエゾ抵抗層を従来手法で形成した n 型のピエゾ抵抗と比較するため、電気的な特性を評価した。まずピエゾ抵抗層の電流電圧(I-V)特性を評価した。Figure 3.17 に $-5\ \text{V}$ から $5\ \text{V}$ までの電圧掃引に対する電流応答を示している。I-V 特性の計測は室温で行い、四探針のソースメータ(2612A, Keithley Instruments)を用いた。電流と電圧の間には

 第3章 表面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー

線形な関係が見られ、最小二乗法による近似直線の傾きは $1.24 \times 10^{-3} \text{ A/V}$ であった。この結果から、ピエゾ抵抗層と電極層間の接触は整流作用が無いオーミック接触であることが確認された。また、製作したピエゾ抵抗層の室温での初期抵抗値を R_1 と定義するとその値は、 806Ω であった。ここで、ピエゾ抵抗の幅を W 、実効長さを L_p とすると、実測シート抵抗 R_s は以下の式で表される。

$$R_s = R_1 \frac{W}{L_p} \quad (3.20)$$

設計に基づき、ピエゾ抵抗層の幅を $W = 0.1 \text{ mm}$ 、実効長さを $L_p = 3.2 \text{ mm}$ とすると、シート抵抗は $R_s = 25.2 \Omega/\text{sq}$ と概算される。

続いて、3.3.4 に示した SIMS プロファイルと、実測シート抵抗の値から、有効ドーピング深さを推定した。ここで、レーザドーピング層は深さ方向に濃度変化を持つため、物理的なドーピング深さを直接測定することは困難である。そのため本研究では、SIMS により得られた濃度プロファイルとキャリア移動度モデルを用いて、深さ方向の局所導電率を評価し、その累積寄与から電気的な有効深さを定義する手法を採用した。

SIMS から得られる濃度 $N(z)$ は化学的な濃度であり、すべてが電気的に活性化しているとは限らない。そこで、深さ方向に一定値を仮定したキャリア活性化率 f を導入し、深さ z における有効キャリア濃度 $n(z)$ を次式で定義した。

$$n(z) = fN(z) \quad (3.21)$$

一方、ドーピング濃度 N の n 型 Si の電子移動度 $\mu_n(N)$ は、Masetti のモデルを用いて次式で表される [84]。

$$\mu_n(N) = \mu_0 + \frac{\mu_{\max} - \mu_0}{1 + (N/C_r)^\alpha} - \frac{\mu_1}{1 + (C_s/N)^\beta} \quad (3.22)$$

このモデルは、広いドーピング濃度領域、とくに高濃度領域においても適用可能であるため、今回使用した。また、各パラメータは実験値からフィッティングすることで求められている。SIMS から得られた濃度 $N(z_i)$ を式(3.22)に代入することで、深さ方向の移動度分布 $\mu_n(N(z))$ を求めることができる。また、深さ z_i における局所的な導電率 $\sigma(z)$ は、電荷 q 、移動度 $\mu_n(N(z))$ と式(3.21)を用いて次式で求められる。

$$\sigma(z) = q\mu_n(N(z))n(z) = q\mu_n(N(z))fN(z) \quad (3.23)$$

深さ方向に異なる導電率を持つ層は並列に接続されるため、深さ方向の導電率を積分すること

 第3章 表面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー

で単位面積当たりの導電率であるシートコンダクタンス G_s が次式で定義される.

$$G_s(f) = \int_0^{\infty} \sigma(z) dz \quad (3.24)$$

ここでは積分上限は無限大になっているが、レーザドーピング層の厚みがより深い領域では濃度が背景レベルとなり、 $\sigma(z) \approx 0$ となるため、実質的には有限の深さで積分が収束する. よって、このシートコンダクタンスと実測値から算出したシート抵抗 R_s は以下の関係で表される.

$$R_s = \frac{1}{G_s(f_{\text{act}})} \quad (3.25)$$

したがって、実測抵抗値から求めた実測シート抵抗と SIMS プロファイルから求めた移動度より、式(3.25)を満たす f_{act} を数値的に求めることで、キャリア活性率 f_{act} が推定できる.

一方、SIMS プロファイルは、 n 個の非等間隔の離散的な深さと濃度のデータ ($z_i, N(z_i)$) として得られるため、実際の計算では式(3.24)を数値積分として近似した. 具体的には、中間点 i に対しては

$$\Delta z_i = \frac{z_{i+1} - z_{i-1}}{2} \quad (3.26)$$

と定義し、端点については片側差分を用いることで、台形公式に相当する重みを深さ方向の微小区間幅を Δz_i に含めた離散化を行った. したがって、式(3.24)は以下のように近似される.

$$G_s(f) \approx \sum_{i=1}^n \sigma(z_i; f) \Delta z_i \quad (3.27)$$

この時、式(3.25)を満たす活性化率を f_{pred} とすると、深さ方向の局所導電率 $\sigma(z; f_{\text{pred}})$ が定まる. したがって、微小区間 Δz_i のシートコンダクタンス寄与は、次式で表され、

$$\Delta G_s(z_i; f_{\text{pred}}) = \sigma(z_i; f_{\text{pred}}) \Delta z_i \quad (3.28)$$

全深さの寄与 $G_{s,\text{tot}}$ は、次式で表される.

$$G_{s,\text{tot}} = \sum_{i=1}^n \Delta G_s(z_i; f_{\text{pred}}) \quad (3.29)$$

よって、深さ z_k までに蓄積される寄与の割合 $F(z_k)$ は

$$F(z_k) = \frac{\sum_{i=1}^k \Delta G_s(z_i; f_{\text{pred}})}{G_{s,\text{tot}}} \quad (3.30)$$

であり、深さ z_k までに蓄積されるシートコンダクタンスの割合を示す. 本章では、 $F(z_k) = 0.9$ の深さを有効ドーピング深さ d_{eff} と定義した. 求める活性化率 f_{pred} は SIMS プロファイルと Masetti のモデルに基づく非線形な関数から算出されるため、解析的に解くことができない. そこで、方

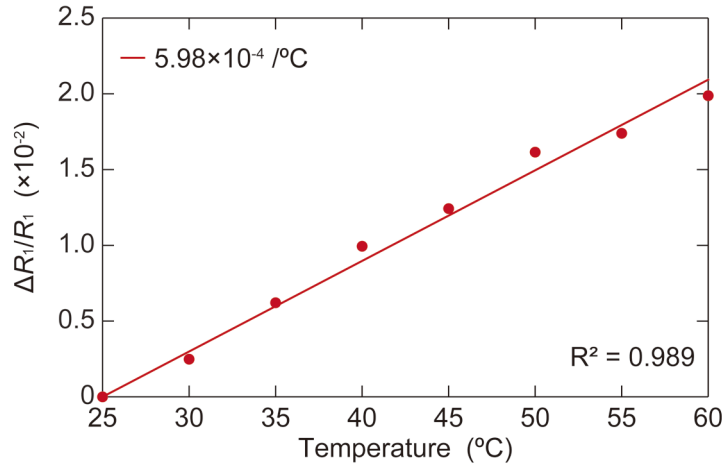


Figure 3.18 形成したピエゾ抵抗層の温度特性.

程式の解を近似的に求めることができるニュートン法を用いて算出した．また，Masetti モデルの各パラメータには文献より， $\mu_0 = 68.5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ， $\mu_{\max} = 1414 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ， $\mu_1 = 56.1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ， $C_r = 9.20 \times 10^{16}$ ， $C_s = 3.41 \times 10^{20}$ ， $\alpha = 0.711$ ， $\beta = 1.98$ を代入した [84]．また，電荷は $q = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ とした．ニュートン法により得られた活性化率 f_{pred} を用いて， $F(z_k) = 0.9$ を満たす有効ドーブ深さを算出した結果， $f_{\text{pred}} = 0.497$ ， $d_{\text{eff}} = 2.66 \text{ }\mu\text{m}$ となった．また，得られた有効ドーブ深さをを用いてピエゾ抵抗層の実効抵抗率 ρ_{eff} を算出すると， $\rho_{\text{eff}} = 6.70 \times 10^{-3} \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ であった．

3.4.2 温度特性の評価

続いて，形成したピエゾ抵抗層の温度特性を評価した．恒温槽(SH-222, Espec Corp.)を用い，温度を 25°C から 60°C まで 5°C 刻みで上昇させながらセンサの抵抗値をデジタルマルチメータ(DT4252, Hioki E. E. Corp.)で測定した．Figure 3.18 に，温度と抵抗変化率 $\Delta R_1/R_1$ の関係を示す．センサは温度変化に対して概ね線形な抵抗変化を示した．このとき，抵抗変化率を温度に対して一次近似することにより評価した抵抗の温度係数(Temperature coefficient of resistance : TCR)は $598 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ であった．この値を文献値と比較するために，抵抗率の温度係数へと変換した．算出した TCR に前述の実効抵抗率 ρ_{eff} をかけることで抵抗率の温度係数が与えられ，その値は $4.01 \times 10^{-6} \text{ }\Omega\cdot\text{cm}/^\circ\text{C}$ となった．文献より，P のドーブ濃度がおよそ 10^{19} cm^{-3} 程度の n 型 Si においては，室温付近における抵抗率の温度係数は概ね線形で，その値は約 $6.7 \times 10^{-6} \text{ }\Omega\cdot\text{cm}/^\circ\text{C}$ と報告されている [85]．得られたピエゾ抵抗の抵抗率の温度係数が文献値よりも小さいのは，レーザドーブによって形成されたピエゾ抵抗層には結晶欠陥が存在し，有効キャリア率が低下している

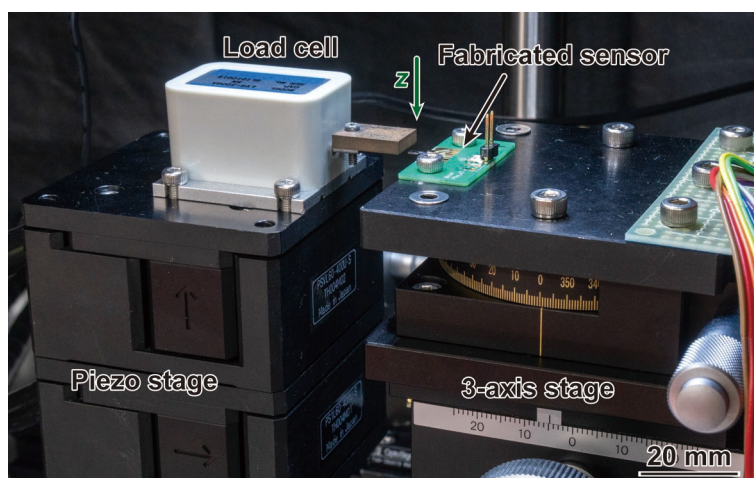


Figure 3.19 センサのばね定数計測のための実験セットアップの写真.

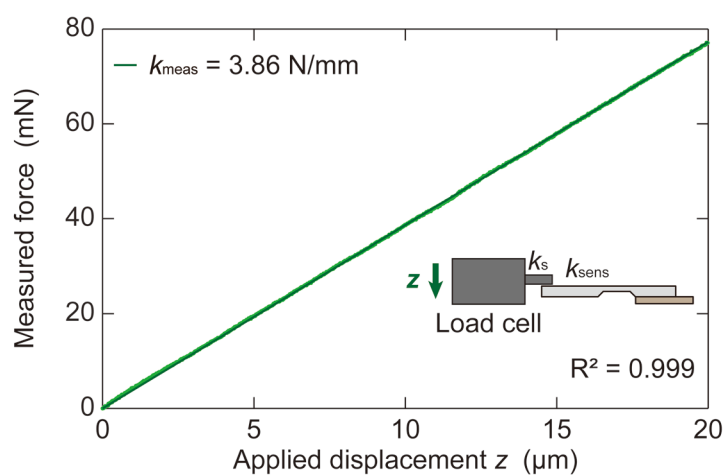


Figure 3.20 ロードセルの変位と計測された力の関係.

ためである．これにより温度上昇による移動度の低下量が減少し，結果として抵抗の温度変化量が抑制されたと考えられる．

3.5 センサの機械的特性評価

3.5.1 ばね定数の評価

次に，製作したセンサの機械的特性を評価した．センサのばね定数評価のためのセットアップを Figure 3.19 に示す．製作したセンサをステージ上に固定し，向かい側には，定格容量が 10

 第3章 表面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー

N のロードセル(LVS-1KA, KYOWA ELECTRONIC INSTRUMENTS Co., Ltd)を取り付けたピエゾステージ(PSVL-400U-S, THK Precision Co., Ltd.)を設置した。この時、ピエゾステージは垂直方向に振動する。ここで本章においては、垂直下方向を z 軸正方向と定義する。また、ロードセル先端にはカンチレバーに変位を印加するための金属片を固定した。センサを固定したステージおよびピエゾステージはいずれも三軸ステージ上に設置され、センサとロードセルの位置を高精度に制御できる。まず、セットアップ上方から顕微鏡でカンチレバーを観察しながら、三軸ステージを用いて金属片をカンチレバーの十字マークの位置に合わせて接触させた。その後、ピエゾステージを駆動して z 軸方向に変位を与え、その時発生した力をロードセルを用いて計測した。Figure 3.20 にピエゾステージの変位と測定された力の関係を示す。入力された $20\text{ }\mu\text{m}$ までの変位に対して、力が線形に発生していることが確認できる。よって、センサへの入力変位は最大 $20\text{ }\mu\text{m}$ まで、ばね定数を用いて力に変換できる。この時、計測されたばね定数 k_{meas} は 3.86 N/mm であった。ただし、この値はロードセルなどの実験セットアップとセンサが直列に接続された合成ばね定数を表している。そのため、実験セットアップのばね定数を k_s とすると、センサのばね定数 k_{sens} は次の式で表される。

$$k_{\text{sens}} = \frac{k_s k_{\text{meas}}}{k_s - k_{\text{meas}}} \quad (3.31)$$

実験セットアップである金属片を固定したロードセルのばね定数 k_s は 66.3 N/mm であった。よって式(3.31)より、本センサの実験的に評価されたばね定数 k_{sens} は 4.10 N/mm となった。一方、FEM シミュレーションから得られたばね定数は 10.8 N/mm であり、実験値はシミュレーション値と比較して約 62%の低下が確認された。この差異は、センサチップを PCB に固定する際に用いた接着剤が、変位の印加にともない弾性変形したためと考えられる。本センサのばね定数については、次節での共振周波数特性の評価結果と合わせて後述する。

3.5.2 共振周波数の評価

次に、センサの周波数特性を評価した。FEM シミュレーションにおいて、センサの第一次固有振動数は約 12 kHz であり、その振動方向が面外方向であることが確認された。この結果に基づき、 1 kHz から 15 kHz の周波数範囲において、センサの面外方向の周波数特性を評価した。センサを加振器(Exciter Type 4810, Hottinger Brüel & Kjær)に取り付け、 1 kHz から 15 kHz の周波数範囲の一定振幅の正弦波振動を加え、その際のセンサの面外方向の振動をレーザドップラー振動計(MLD-221D, NEOARK Corp.)を用いて計測した。この時、カンチレバーの面外方向と、加振器の振動方向が一致するようにセンサを固定した。加振器およびレーザドップラー振動計は

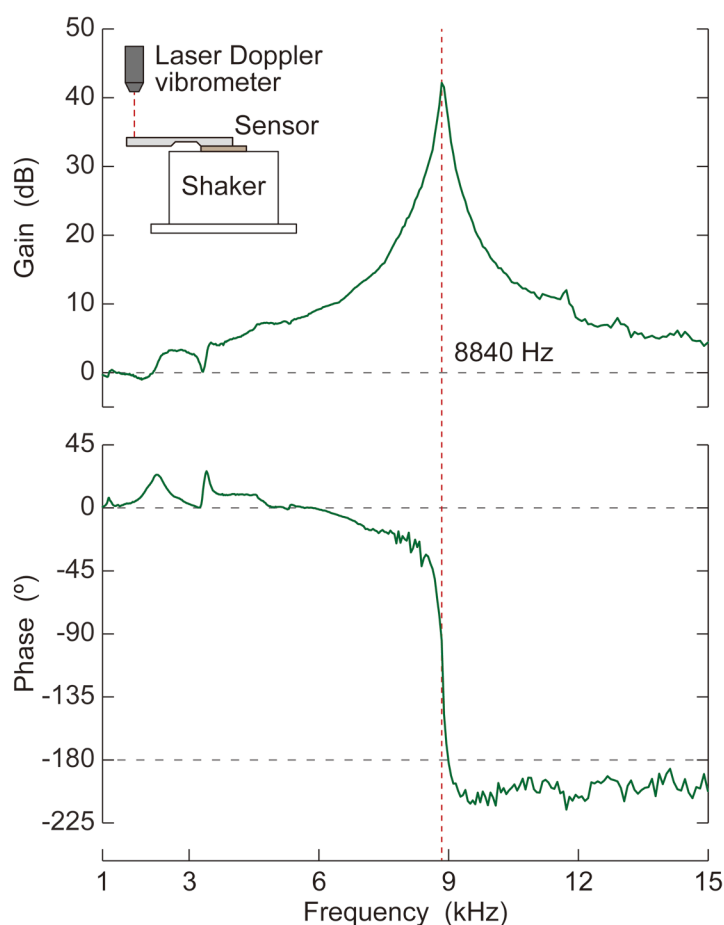


Figure 3.21 センサの面外方向の周波数特性.

ロックインアンプ(MFLI, Zurich Instruments Ltd.)に接続されており、加振信号を基準として、カンチレバー先端の振動振幅および位相を周波数ごとに取得した。さらに、カンチレバー底部の振動についても同様に振動振幅および位相を取得した。ここで、利得はカンチレバー底部の振動振幅に対するカンチレバー先端の振動振幅の比として定義した。位相シフトは、先端および底部それぞれの位相の差分として算出した。Figure 3.21 にセンサの面外方向の周波数特性を示す。利得が最大となる周波数および位相シフトの位置より、カンチレバーの共振周波数は 8.84 kHz であることが確認された。ただし、位相に関しては、共振点手前からわずかな位相遅れが生じ、共振後も約 -200° に達するなど、理想的な周波数応答とは一部異なる挙動が観測された。このような挙動は、加振器、固定治具およびセンサ構造の固定によって、カンチレバー先端や底部の運動が理想的な剛体入力とならなかったことに起因すると考えられる。FEM シミュレーションから得られた一次固有振動数の 12.1 kHz と比較して、約 27%の低下が確認された。この

差異も、3.5.1 節で述べたように接着剤の弾性変形によるものと考えられる。次節では、ばね定数評価結果と共振周波数から、本センサのばね定数について検討する。

3.5.3 センサ固定部のばね定数の推定

製作したセンサにおいて観測されたばね定数および共振周波数のシミュレーション値との差異が、固定部の弾性変形に起因するものか評価するため、カンチレバー構造の固定部を十分に大きくしたセンサチップを新たに製作し、ばね定数および共振周波数の評価を行った。実験結果の詳細は付録 D に示す。その結果、カンチレバー構造のばね定数は、10.6 N/mm、共振周波数は 12.7 kHz であった。これらの値は、FEM シミュレーションの結果と概ね一致しており、製作したセンサにおいて観測されたばね定数および共振周波数の低下が、固定部の弾性変形に起因するものであることが示された。

次に、ばね定数と共振周波数の低下量から固定部のばね定数を推定する。PCB に接着固定されたセンサを 1 自由度系のモデルとして近似すると、カンチレバーの一次共振周波数 f は次式で表される。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m_{\text{eff}}}} \quad (3.32)$$

ここで、 k はカンチレバーのばね定数、 m_{eff} はモデルにおける有効質量である。接着固定の際の追加の質量や形状変化が十分小さい場合、接着前後で m_{eff} は一定とみなすことができる。したがって、接着前後の共振周波数比とばね定数比の間には、次式の関係が成り立つ。

$$\left(\frac{f_{\text{total}}}{f_c}\right)^2 = \frac{k_{\text{total}}}{k_c} \quad (3.33)$$

ここで、 k_c および f_c はカンチレバー構造そのもののばね定数と共振周波数である。また、 k_{total} および f_{total} は、製作したセンサ全体のばね定数と共振周波数である。付録 D と 3.5.2 節の結果より、 $k_c = 10.6 \text{ N/mm}$ 、 $f_c = 12.7 \text{ kHz}$ 、 $f_{\text{total}} = 8.84 \text{ kHz}$ を式(3.33)代入すると、 k_{total} は 5.13 N/mm と推定される。推定されたばね定数の値は 3.5.1 節のばね定数の測定結果である、 $k_{\text{sens}} = 4.10 \text{ N/mm}$ より大きな値となった。本章で製作したセンサ構造のばね定数は比較的大きいため、ばね定数の直接計測の結果は、ロードセルやセットアップの剛性の影響により過小評価される可能性がある。したがって、本研究では共振周波数に基づいて推定した $k_{\text{total}} = 5.13 \text{ N/mm}$ センサ全体のばね定数とする。このばね定数は、カンチレバー構造と固定部が直列に接続された合成ばね定数とみなすことができる。

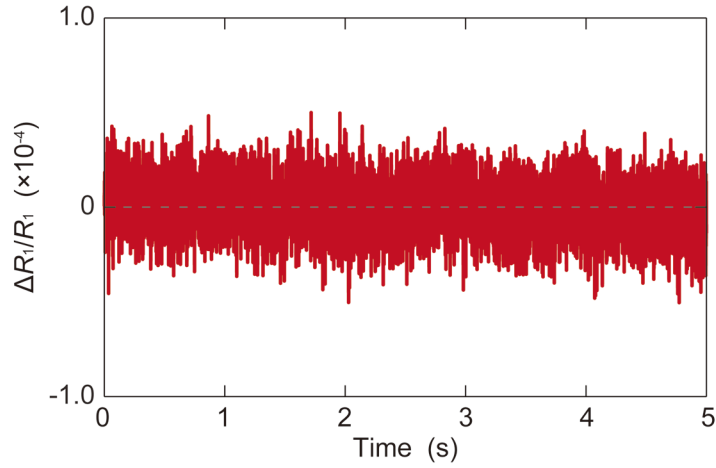


Figure 3.22 製作したセンサの無負荷時のノイズレベルの波形.

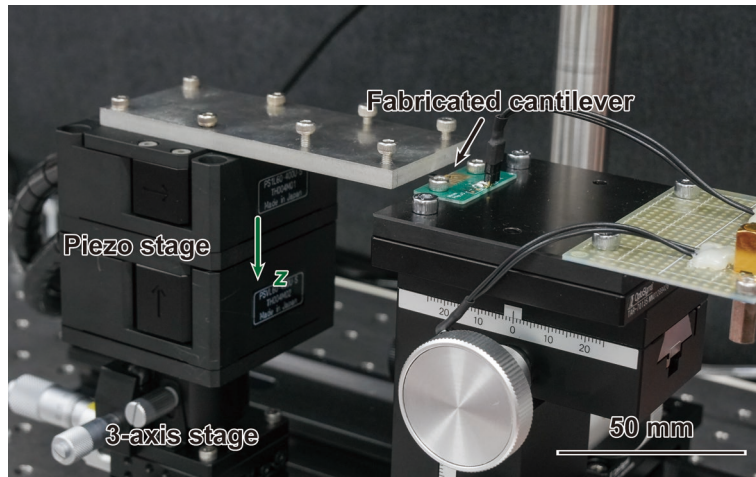


Figure 3.23 変位入力のための実験セットアップの写真.

したがって、固定部のばね定数 k_{fix} は

$$k_{\text{fix}} = \frac{k_c k_{\text{total}}}{k_c - k_{\text{total}}} \approx 9.94 \text{ N/mm} \quad (3.34)$$

と求められる．実測したカンチレバー構造そのもののばね定数 k_c と，固定部のばね定数 k_{fix} より，センサ先端に変位 z を印加した際に，カンチレバー構造に生じる変位 z_c および固定部に生じる変位 z_{fix} はそれぞれ次式で表される．

$$z_c = \frac{k_{\text{total}}}{k_c} z \approx 0.484z, \quad z_{\text{fix}} = \frac{k_{\text{total}}}{k_{\text{fix}}} z \approx 0.516z \quad (3.35)$$

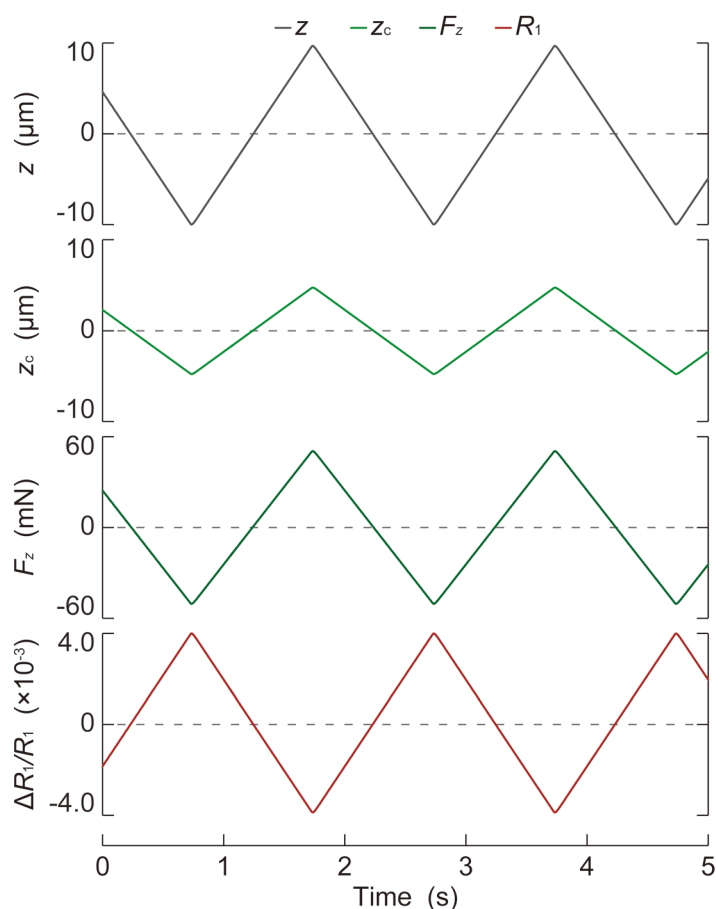


Figure 3.24 ピエゾステージによる入力変位 z ，換算された入力変位 z_c ，換算された力 F_z の波形に対するセンサの出力波形。

よって，入力変位は概ね 12:13 でセンサチップの変位と固定部の変位部に分割される。

3.6 センサの応答特性評価

3.6.1 ノイズレベルの評価

最後に，センサの応答特性を評価した。まず，ピエゾ抵抗層のノイズレベルを評価した。以降の実験において，センサ応答として抵抗変化率を計測する場合，ブリッジアンプ回路(CS1709, Analog Signal Technologies, Co., Ltd.)を用いてカンチレバーの抵抗変化を電圧変化に変換した後，オシロスコープ(DL950, Yokogawa Test & Measurement Corp.)を用いて計測した。この時，アンプ

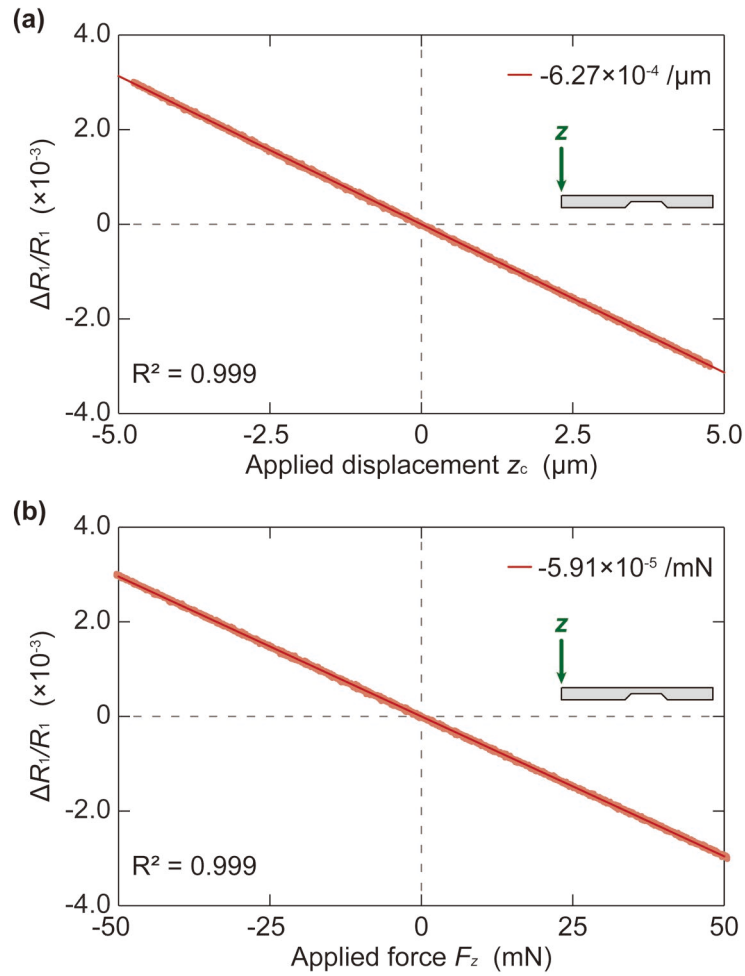


Figure 3.25 (a) 換算された入力変位に対するセンサの抵抗変化率. (b) 換算された力に対するセンサの抵抗変化率.

回路の増幅率を A とすると、抵抗変化率 $\Delta R_1/R_1$ と電圧変化 ΔV の関係は式(2.17)より、次式で表される。ただし、使用したブリッジ回路の入力電圧 V_0 は 1 V であった。

$$\Delta V = A \frac{\Delta R_1}{4R_1} \quad (3.36)$$

本研究では増幅率 A を常に 100 と設定した。また、電圧信号の測定の際には、高周波ノイズを抑制するため、オシロスコープで 400 Hz のローパスフィルタ機能を利用した。Figure 3.22 に、外力を加えない状態で 5s 間測定したカンチレバーのノイズレベルを示す。この時のノイズに起因する抵抗変化率の実効値 $\Delta R_{1,\text{RMS}}/R_1$ は 1.35×10^{-5} であった。

3.6.2 入力した変位，力に対する応答評価

次に，製作したセンサの応答特性を評価した．Figure 3.23 に応答評価に利用したセットアップの写真を示す．製作したセンサをステージ上に固定し，カンチレバー先端に設けた十字マークに対し，ピエゾステージに取り付けた金属片で変位を与えた．この時，金属片は幅 40 mm，厚さ 5 mm，長さ 60 mm のアルミ製であり，アルミのヤング率を 69 GPa として計算すると，カンチレバーと比較して十分高い 2.0 kN/mm というばね定数を有している．そのため，ピエゾステージの変位量を金属片先端の変位量と等しいものとみなした．

Figure 3.24 にセンサの入力変位の波形に対する，センサの出力波形を示す．灰色の線はピエゾステージでセンサに与えた変位，黄緑色の線はセンサチップに生じる変位，緑色の線はセンサのばね定数を用いて変位から換算した力，赤色の線はそれらに対応するセンサの抵抗変化率を示す．変位の換算および力への換算は，ピエゾステージの変位に対して $k_{\text{total}} = 5.13 \text{ N/mm}$ ， $z_c/z = 0.484$ を掛け合わせることで行った．振幅 $\pm 10 \text{ }\mu\text{m}$ ，周波数 0.5 Hz の三角波でピエゾステージを駆動したところ，センサチップは約 $\pm 5 \text{ }\mu\text{m}$ 変位し，その時に発生した力の振幅は約 $\pm 50 \text{ mN}$ であった．

Figure 3.25(a)に，センサチップに入力した変位と抵抗変化率の関係を示す．センサチップ先端に z 軸正方向の変位を与えた際には抵抗が減少したため，形成したピエゾ抵抗層は引張ひずみによって抵抗が減少するということが確認された．これは Si の(100)面上に形成された $\langle 110 \rangle$ 方向の n 型ピエゾ抵抗における典型的な特性である．また，変位と抵抗変化率の関係は線形であり，その傾きである単位変位当たりの抵抗変化率は $-6.27 \times 10^{-4} / \mu\text{m}$ であった．よって，ノイズレベルを単位変位当たりの抵抗変化率で除すことで得られる変位分解能は 21.5 nm であった．さらに，単位変位当たりの抵抗変化率をシミュレーションから得られた単位変位当たりの表面平均ひずみで除すことで，ゲージ率を算出した結果 -32.3 となった．グラフにしたものに加えて，6 個のセンサを同様のプロセスで製作して，同様の手法でゲージ率の評価を行った．その結果，ゲージ率の平均値は -31.4，標準偏差は 1.32 であり，95%信頼区間は -30.2 から -32.6 であった．このことから，レーザドーピングによるピエゾ抵抗層形成において，ピエゾ抵抗層の製作再現性が高いことが確認された． $\langle 110 \rangle$ 方向の n 型シリコンにおける典型的なゲージ率 -31.6 と比較すると，本センサは概ね理論値に近い性能を示している [68]．一方で，FEM シミュレーションによるひずみ分布は実際のセンサ表面に発生するひずみを完全に再現できない可能性があること，実験セットアップの関係により，センサチップに生じる変位量が推定値である点を考慮すると，ゲージ率が実際よりも高く評価されている可能性がある．しかしながら，製作されたピエゾ抵抗層のゲージ率は，少なくとも，ピエゾステージの変位が全てセンサチップに印加され

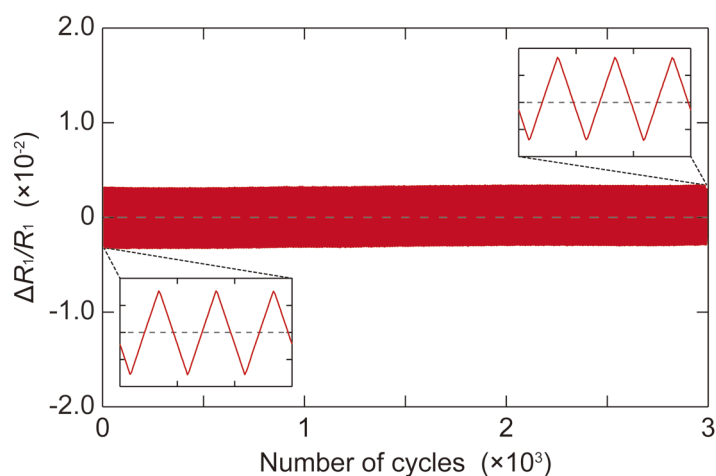


Figure 3.26 繰り返し変位入力に対するセンサの応答波形.

たと仮定した場合に概算されるゲージ率である -15.6 よりは大きい値であると考えられる.

Figure 3.25(b)には変換された力とセンサの抵抗変化率の関係を示す. 入力変位がばね定数を計測した際に印加した $20\ \mu\text{m}$ の変位範囲内であったため, 力はセンサのばね定数を用いて入力変位から変換された. 製作したセンサは印加した力に対して線形な応答を示し, その感度は $-5.91 \times 10^{-5} / \text{mN}$ であった. よって, ノイズレベルから推定されるセンサの分解能は $0.228\ \text{mN}$ であった.

3.6.3 繰り返し負荷に対する応答評価

最後に, センサ応答の再現性を評価した. 振幅 $\pm 10\ \mu\text{m}$, $0.5\ \text{Hz}$ の三角波で 3000 サイクル, つまり $100\ \text{min}$ ピエゾステージを駆動し, センサに変位を印加し続けて出力のドリフトを評価した. 結果を Figure 3.26 に示す. 3000 サイクルの力を印加後, センサ応答にはわずかなドリフトが確認された. この時の抵抗変化率のドリフト量は 3.84×10^{-4} であった. これにより, 製作したセンサが高い安定性を有することが確認された. これは, カンチレバーの材料である単結晶 Si が粘弾性をほとんど示さない弾性体であることに加え, 提案するレーザドーピングによって形成されたピエゾ抵抗層の電気的特性が安定しているためである. わずかなドリフトは周囲温度の変動によるものと考えられ, 抵抗の温度係数に基づいて算出した対応する温度変化は約 0.64°C であり, この推測が妥当であると言える.

3.7 本章の総括

3.7.1 本章の結論

本章では、レーザドーピングを用いた多軸力センサ製作の第一段階として、表面レーザドーピングを利用したデバイス表面へのピエゾ抵抗形成手法を提案し、それを用いて製作したピエゾ抵抗型カンチレバーの基礎特性について評価した。提案プロセスは、レーザドーピングによるピエゾ抵抗層の形成と、レーザ切断およびエッチングによるセンサ構造の形成という、二つの工程から構成される。すべての工程は単一のレーザ加工システムを用いて実施され、従来のリソグラフィ工程を必要としない。さらに、レーザによる直接加工により、ピエゾ抵抗層がカンチレバー構造と自動的に位置合わせされるという利点を有する。提案するプロセスによるセンサ構造の製作再現性は優れており、製作されたセンサ構造は設計寸法と一致しており、ピエゾ抵抗層も幅約 $100\text{ }\mu\text{m}$ で設計通り形成されていた。また、レーザドーピングに関しては、ピエゾ抵抗層表面において、 10^{19} cm^{-3} 程度、深さ $2\text{ }\mu\text{m}$ においても 10^{18} cm^{-3} を超える P 濃度が得られた。一方で、TEM をはじめとするピエゾ抵抗層の結晶性評価の結果、ピエゾ抵抗層の大部分は基板と同様の結晶方位を維持しているものの、部分的に多結晶化や欠陥が生じていることが確認された。また、形成されたピエゾ抵抗層は、I-V 特性、抵抗率、温度特性などの電気的な特性が評価され、キャリアが完全には活性化していないことが予想されるものの、従来プロセスで製作されたピエゾ抵抗と同様の電気特性を示した。さらに、変位や力に対して本センサは線形に応答を示し、ノイズレベルから算出した変位分解能は約 22 nm 、力分解能は約 0.23 mN であった。シミュレーションおよび実験結果から概算したゲージ率の絶対値は少なくとも 15、最大で 30 程度となり、高い感度を得られていることが確認された。加えて、複数のセンサチップを用いた評価により、ゲージ率のばらつきが低く、ピエゾ抵抗層の製作再現性の高さも確認された。製作したセンサは、3000 サイクルの繰り返し負荷試験においても顕著なドリフトを示さず、高い安定性を有することが確認された。

本章の目的は、レーザ加工とレーザドーピングを組み合わせた提案手法により、ピエゾ抵抗型 MEMS 力センサが実際に製作可能であることを実証することであった。本章の結果から、レーザドーピングによって形成されたピエゾ抵抗層は、ゲージ率の絶対値が目標としていた 10 を上回り、最大で 30 程度に達することが示された。この結果は、MEMS プロセスで用いられる、Ni-Cr 合金や CrN などの典型的な金属ひずみゲージの値を大きく上回り [86], [87], (100)面上の $\langle 110 \rangle$ 方位の n 型ピエゾ抵抗の理論的な最大値に近く、形成されたピエゾ抵抗層がセンサ素子として十分な感度を有していることを示している。また、面外方向に対して選択的に変形しや

第3章 表面レーザドーピングを利用した piezo 抵抗型カンチレバー

すいノッチ構造を有するカンチレバー構造が、レーザ加工のみで設計通りに形成可能であり、製作されたセンサは力および変位入力に対して線形な応答を示した。以上より、提案する手法はデバイス表面のみに piezo 抵抗層を形成する用途においては、十分有効なセンサ製作手法であることが示された。また、本章で得られた設計およびプロセスに関する知見は、次章以降で取り扱う側面への piezo 抵抗形成および多軸力センサの実現に向けた基盤となるものである。

3.7.2 本章の考察

現時点では、ドーピング領域の一部にクラックや部分的な多結晶化が観察されており、piezo 抵抗層表面には約 $2\text{ }\mu\text{m}$ の表面粗さが観察されている。これらはキャリア輸送を妨げ、ゲージ率の低下やノイズ増大の一因となる可能性がある。このようなドーピング領域品質の課題に対しては、レーザ照射条件の最適化が有効であると考えられる。パルス幅の長いレーザを用いることで、より緩やかな加熱および冷却が可能となり、結晶欠陥の生成や表面粗さを低減し、ドーピング領域の品質向上が期待される。ドーピング領域品質の改善に加えて、センサ性能の向上という観点からは、piezo 抵抗層寸法の微細化も重要な要素である。本章では piezo 抵抗層の幅を $100\text{ }\mu\text{m}$ としたが、より微細な構造も原理的には十分に実現可能である。単一レーザパルスによって約 $15\text{ }\mu\text{m}$ 径の溶融領域が形成されることから、 $50\text{ }\mu\text{m}$ 程度の幅を有する piezo 抵抗層の形成は可能であると考えられる。本研究で利用したレーザ加工システムの加工領域は $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ であり、加工領域とレーザスポット径にはトレードオフの関係がある。そのため、センササイズに応じて加工領域を狭めた光学系を用いることで、より微細な piezo 抵抗層の形成が可能になると期待される。

また、ドーピング工程と切断工程に対して最適な波長やパルス幅は必ずしも一致しないため、波長切替による工程の最適化も有効な選択肢の一つである。本研究では単一レーザシステム内で連続加工を行うことにより、センサ素子と構造がアライメントされる点、および低コストかつ短いリードタイムで試作可能である点を重視し、同一波長システムによる一貫加工のプロセスを採用した。一方で、波長変換機を用いる構成や、工程ごとに異なるレーザ波長の加工システムを用いる手法も検討の余地がある。しかし、波長変換機方式では光学系を共有するため、焦点位置やスポット径が波長に依存して変化し、各工程ごとに加工条件の調整が必要となる。そのため、同一装置内で波長を切り替える構成は必ずしも工程全体の簡素化につながらない。また、複数のレーザ加工システムを用いる方式では、装置コストの増加や工程間でのアライメントが必要といった課題が生じる。したがって、レーザ加工システムの選択は、性能最適化と製作効率とのトレードオフを考慮し、目的に応じて行う必要がある。

第3章 表面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー

本章で示したセンサの力分解能はサブ mN オーダーであり，この値は，本研究で用いたカンチレバー寸法から算出されるばね定数，形成されたピエゾ抵抗層のゲージ率，および測定系に起因するノイズレベルに基づいて説明することができる．実際に，ばね定数は設計値およびシミュレーション結果と良好に一致しており，また，ゲージ率も十分に高い値が得られていることから，本章で得られた力分解能のオーダーは妥当であると考えられる．より微小な力の計測に関しては，カンチレバーの寸法を変更することで対応可能である．ピエゾ抵抗型カンチレバーにおける，力に対する抵抗変化率は式(2.15)に示されるように，梁の長さに一次比例し，梁幅の一乗に反比例し，曲げ方向の梁厚の二乗に反比例する．したがって，構造設計を変更することにより，少なくとも一桁程度の力分解能向上は十分に実現可能であると考えられる．

さらに，実用化を見据えた観点からは，繰り返し試験において確認された温度ドリフトへの対応が重要となる．抵抗の温度係数が線形であることから，温度補償用のピエゾ抵抗を追加し差動出力を取得することで，従来のピエゾ抵抗型センサと同様の手法により温度ドリフトを補正できると考えられる．

第4章 液浸側面レーザドーピングを利用した ピエゾ抵抗型カンチレバー

4.1 本章の概要

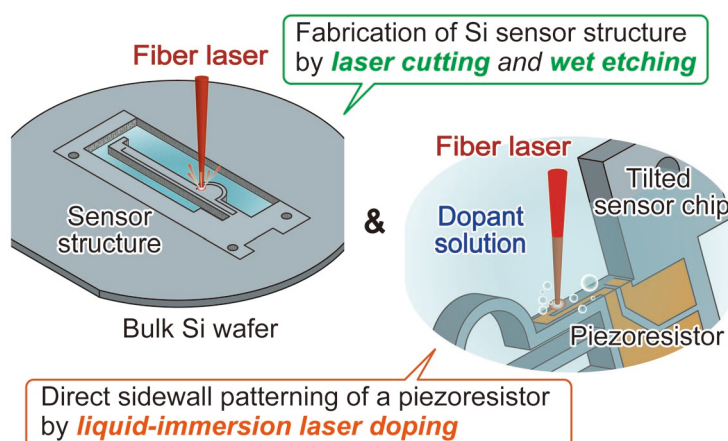


Figure 4.1 液浸側面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー製作手法の概要.

本章では、レーザドーピングを用いた多軸力センサ製作の第二段階として、液浸レーザドーピングを利用したデバイス側面へのピエゾ抵抗形成手法を提案し、それを用いて製作したピエゾ抵抗型カンチレバーの基礎特性評価について述べる。第3章では、デバイス表面へのレーザドーピングによるピエゾ抵抗層形成手法を確立したが、本研究で目的とする多軸力センサの実現に向けてはセンサ構造側面へのピエゾ抵抗層形成が不可欠である。そこで本章の目的は、第3章で確立したレーザドーピングによる表面ピエゾ抵抗層形成手法を基盤として、ドーパント溶液中に基板を浸漬した状態でレーザ照射を行う液浸レーザドーピングを用い、側面ピエゾ抵

第4章 液浸側面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー

抗層形成手法を確立することである。具体的には、以下の観点から提案手法の有効性を評価する。第一に、面内方向の変形に対して選択的に応答する位置に、配線用の支持梁を介することなく土台構造表面へ直接配線可能な側面ピエゾ抵抗層が形成可能であることを確認する。第二に、側面ピエゾ抵抗層が形成された支持梁が、面内方向の力入力に対して相対的に低剛性となるよう、梁厚に対して梁幅が $1/5$ 以下となる高アスペクト比の構造が実現可能であることを示す。また、第3章と同様に、形成されたピエゾ抵抗層のゲージ率の絶対値が 10 を超えることも目標とする。

次節以降では、まず、提案するプロセスの概要及び、製作するカンチレバーの設計について述べる。次に、提案するセンサの製作手法および得られたデバイス形状、並びにピエゾ抵抗層の結晶性評価およびドーパ濃度の評価について述べる。その後、ピエゾ抵抗層の電気的特性、センサの機械的特性および応答特性について評価する。最後に、製作したセンサの性能を既存のピエゾ抵抗型センサと比較し、本手法の有用性について考察する。

4.2 プロセス概要および設計

4.2.1 提案するプロセスの概要

Figure 4.1 に、本章で提案する液浸側面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバーのコンセプトを示す。レーザ加工によるセンサ構造形成と液浸レーザドーピングによるピエゾ抵抗形成を組み合わせることにより、面内力検出に適した側面ピエゾ抵抗層を有するピエゾ抵抗型カンチレバーを製作する。本章で用いるドーピング対象をドーパント溶液に浸漬させた状態でレーザドーピングを行う液浸レーザドーピング手法自体は既存のものである。しかし、液浸ドーピングを用いてドーピング対象の側面および表面を同時にドーピング源へ接触させることで、三次元構造に対して選択的にピエゾ抵抗層を形成できる点に本手法の新規性がある。このため、ドーパント源を側面へ供給する目的でセンサチップを溶液中に完全に浸漬し、さらに側面と表面を同時にレーザ照射可能とするため、センサチップを傾斜させる。

レーザドーピングには、レーザが照射された領域にのみ選択的にドーピングを行えるという特徴があり、この特徴を生かすことで、センサ側面のひずみ集中部に対して側面ピエゾ抵抗層を選択的に集約して形成することが可能となる。また、側面ピエゾ抵抗層を二次元形状にパターンニングすることで、その両端を面外力および面内力のいずれに対しても変形の生じにくい土台構造側面まで延長することができる。これにより、配線用の支持梁を追加で必要とせず、側

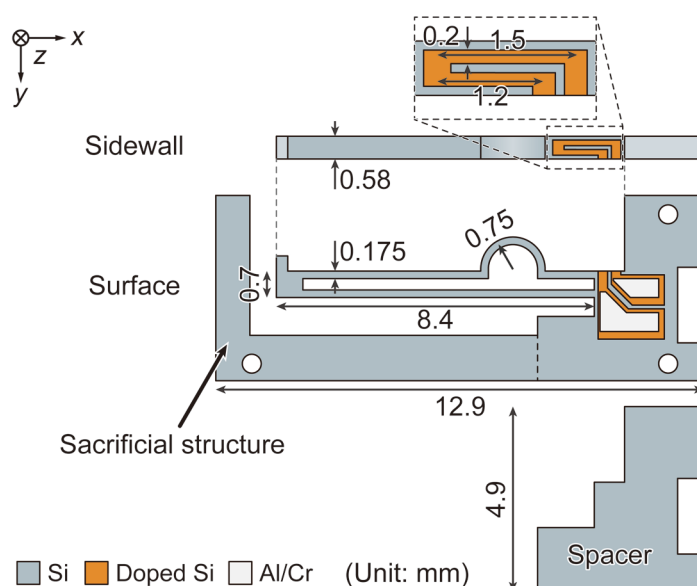


Figure 4.2 製作したセンサチップとスペーサーの設計.

面ピエゾ抵抗層を土台構造表面へ直接配線することが可能となる．さらに，本手法では，センサ構造形成とピエゾ抵抗層形成が別工程であるため，それぞれを独立に設計することが可能である．このため，側面ピエゾ抵抗層が形成された支持梁においても設計自由度が高まり，支持梁の幅を小さく抑えた高アスペクト比構造の形成が可能となる．

このように，本章で提案する手法は，第3章で示した表面レーザドーピング手法を側面ピエゾ抵抗層形成へと拡張したものであり，面内力検出に適した側面ピエゾ抵抗層の配置と，高アスペクト比構造の両立を可能とする点に特徴がある．そのため，本手法は，本研究で目的とする多軸力センサの実現に向けたプロセスとして有用であると考えられる．

4.2.2 設計

Figure 4.2 に，提案するセンサチップの設計を示す．本章では，提案手法によってセンサが実現可能であるかを検証することを目的としているため，カンチレバー構造およびピエゾ抵抗層の寸法は安定して製作可能な値を採用した．センサチップは，2本の支持梁によって支えられたカンチレバー構造を有している．1.2.1節で定義した通り，図中 $-z$ 方向の面をセンサチップ表面，図中 xy 方向の面をセンサチップの側面と定義する．また， z 軸方向を面外方向， y 軸方向を面内方向と定義する．ピエゾ抵抗層はセンサチップ側面の，片方の支持梁の根元上に配置されている．また，ピエゾ抵抗層が形成された支持梁には曲線部が設けられており，この構造によ

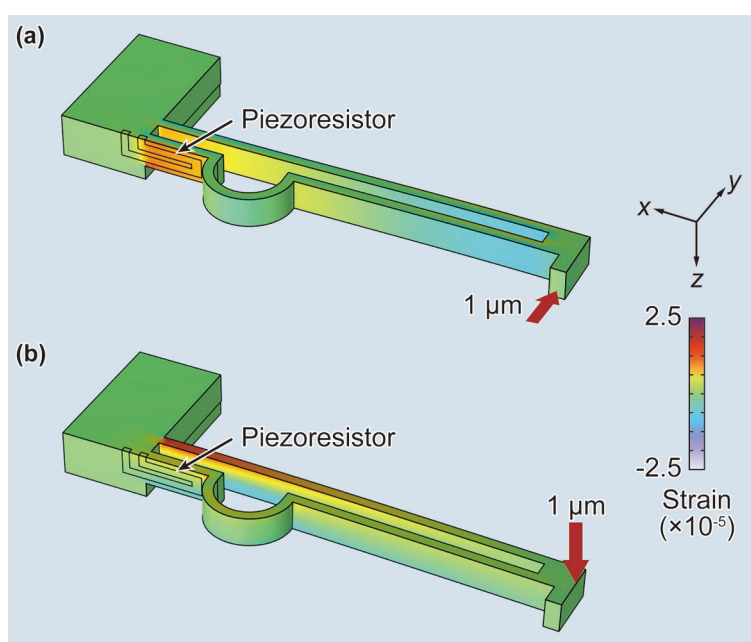


Figure 4.3 入力変位に対するひずみ分布のシミュレーション．(a) 面内方向の変位入力に対するひずみ分布．(b) 面外方向の変位入力に対するひずみ分布．

ってピエゾ抵抗層にひずみが集中する設計となっている [21], [88]. カンチレバーの寸法は、全長 8.4 mm, 支持梁 1 本あたりの幅は 0.175 mm, 支持梁と支持梁の間隔は 0.35 mm, 曲線部の中心の曲率半径は 0.75 mm とし、先端には荷重を印加するための突起が形成されている．また、センサチップ全体の厚さは 580 μm である．なお、これらの設計寸法は、レーザ切断時の線幅およびその後のウェットエッチングによる寸法の縮小を考慮した、製作後の推定値である．

センサチップ製作時にカンチレバー構造の破損を防ぎ、液浸側面ドーピング時にセンサ構造の水平を保持するため、センサチップには犠牲構造が形成されている．この構造はセンサチップを基板へ取り付けた後に取り外す．犠牲構造とセンサチップの境界線は、チップの厚みの約半分まで切断されたハーフカットラインとなっている．さらに、カンチレバー根元および犠牲構造には直径 0.55 mm の穴が設けられており、電極層を蒸着する際に用いるシャドウマスクとのアライメントに利用する．また、センサチップを基板へ固定する際には、カンチレバー底部と同一寸法で厚さ 300 μm のスペーサーを使用する．

ピエゾ抵抗層のひずみ検知領域は、支持梁のひずみ集中部に集約するよう U 字形状にパターンニングされている．一方で、ピエゾ抵抗層の両端は、変形の生じにくい土台構造側面へ延長され、さらに土台構造表面へと配線が引き出されている．このようにピエゾ抵抗層をパターンニングすることで、ひずみ検知領域は面内方向の力入力に対して変形の生じやすい支持梁側面に集

 第4章 液浸側面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー

約される一方、接続領域は変形がほとんど生じない土台構造上に形成される。ピエゾ抵抗層のひずみ検出領域の幅は 0.2 mm で、間隔は 0.1 mm である。

ピエゾ抵抗層の両端はセンサチップ表面まで延長され、その部分には電極パッド領域が形成されている。これらの領域の上には Al/Cr 電極を蒸着し、基板と電氣的に接続できるようになっている。また、ピエゾ抵抗層の有効長は表面側が 1.2 mm で、裏面側が 1.5 mm とした。また、電極パッド領域の寸法は、下側が概ね 1.75 mm×0.8 mm、上側が概ね 1.4 mm×0.8 mm である。電極は、電極パッド領域の外周から 0.1 mm 内側に収まるように設計されている。また、第3章で製作したセンサと同様にセンサチップ表面を Si ウエハの(100)面、カンチレバーの長手方向を<110>方向に一致するようにした。その結果として、側面ピエゾ抵抗層は Si の(110)面上に形成され、その長手方向は<110>方向である。

4.2.3 シミュレーション

提案するセンサ構造の機械的特性を評価するために、FEM シミュレーションによって、変位に対するひずみ分布を評価した。解析には、第3章と同様にヤング率およびポアソン比の方向依存性を考慮した単結晶 Si を使い、カンチレバー表面を(100)面に、カンチレバーの長手方向を<110>方向に一致させた。この時、Si の密度は 2330 kg/m³ とした。FEM モデルでは、設計寸法に基づいてカンチレバー部のみ作成し、配線層およびピエゾ抵抗層は無視した。また、モデルはスペーサが取り付けられた状態を再現し、カンチレバー底部の裏面に固定拘束を与えた。Figure 4.3(a)に、カンチレバー先端に y 方向へ 1 μm の変位を与えた時のひずみ分布シミュレーション結果を示す。図中では、センサの変形を明確にするため 200 倍に変形を誇張して表現されている。ひずみのカラーマップにおいて、赤は引張ひずみ、青は圧縮ひずみを示す。設計したセンサ構造は 2 本の支持梁がカンチレバー先端と根元で固定されているため、両方の支持梁は表面方向から見て S 字状に変形する。そのため、根元の側面には正のひずみが、先端の側面には負のひずみが生じる。また、曲線構造によって支持梁の長さが分断されるため、曲線構造を有する梁の根元部の方が、曲線構造の無い支持梁の根元と比較して、正のひずみがより集中していることが確認された。この時、ピエゾ抵抗層の長手方向の平均表面ひずみは 7.38×10^{-6} であった。また、1 μm の変位を生じさせるために必要な力は、1.89 mN であり、ばね定数は 1.89 N/mm と算出された。一方で、カンチレバー先端の表面に z 方向への 1 μm の変位を印加した際のひずみ分布を Figure 4.3(b)に示す。この時、ピエゾ抵抗層の長手方向の平均表面ひずみは 3.94×10^{-7} であり、y 方向の変位によって生じるひずみの 1/19 となった。これは、側面ピエゾ抵抗層のひずみ検出領域の表面側には正のひずみが、裏面側には負のひずみが若干生じているが、

 第 4 章 液浸側面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー

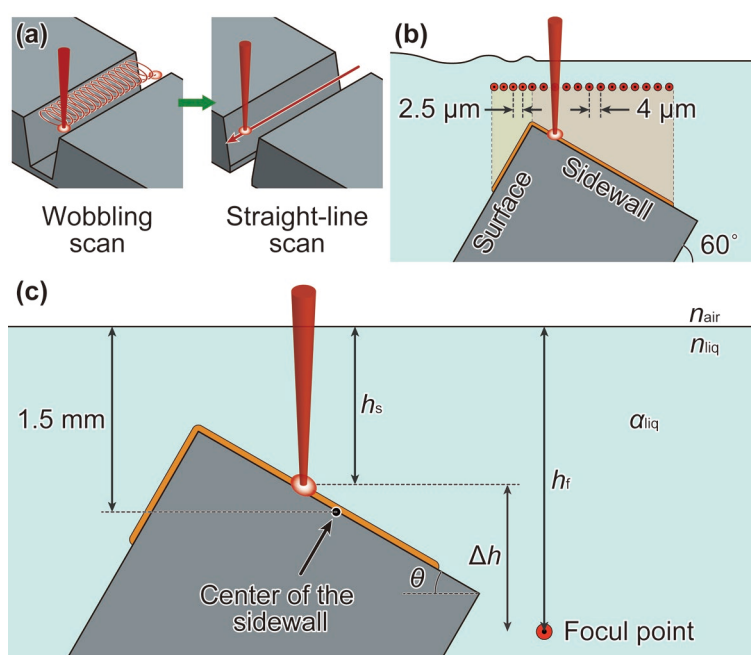


Figure 4.4 センサチップ製作時のレーザ走査条件. (a) レーザ切断時の走査パターン. (b) 液浸ドーピング時の走査パターン. (c) 液浸ドーピング時の焦点とレーザ照射位置の位置関係.

Table 4.1 各プロセスにおけるレーザ照射条件.

Process	Average power [W]	Frequency [Hz]	Scan speed [mm/s]	Scan number [-]
Cutting (wobbling)	30	100k	1000	12
Cutting (straight-line)	30	20k	60	20
Doping (sidewall)	13.5	10k	60	1
Doping (surface)	13.5	10k	60	1

それらが打ち消しあうことによって、小さくなったためである．また、 $1\text{ }\mu\text{m}$ の変位を生じさせるために必要な力は 4.03 mN ，対応するばね定数は 4.03 N/mm と算出された．これらの結果より，提案するカンチレバー構造では，計測対象軸以外の方向から力が加わった場合でもカンチレバーが 2 倍変形しにくく，変形した際に発生するひずみ量約 $1/20$ 倍になることが確認された．したがって，提案するセンサ構造と側面ピエゾ抵抗の形成が独立性の高い面内力計測に有効であることがシミュレーション上で確認された．

第4章 液浸側面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー

同様に FEM シミュレーションにおいて、カンチレバーの固有振動特性を評価した。シミュレーション結果から、カンチレバーは第一次共振モードにおいては面内方向に振動し、その共振周波数は 4976 Hz であった。また、第二次共振モードにおいては面外方向に振動し、その共振周波数は 7981 Hz であることが確認された。

4.3 製作

4.3.1 レーザ照射条件

本章で提案するセンサの製作に用いた、レーザ照射条件について説明する。Figure 4.4 に、レーザ走査条件の模式図を、Table 4.1 に各プロセスのレーザ照射条件を示す。ウエハの切断およびピエゾ抵抗層の形成には、3.3.1 節において前述したレーザ加工装置を用いた。Figure 4.4(a)にウエハ切断時のレーザ走査パターンの模式図を示す。約 625 μm の厚さのウエハを切断するため、波状パターンと直線パターンの2段階のレーザ走査によってウエハを切断した。まず、振幅 100 μm 、ピッチ 20 μm の波状パターンによってウエハを仮切断し、続いて直線パターンによって貫通切断した。この波状パターンによるレーザ照射は、同一領域にエネルギーを集中させることができる [89]。また、波状パターンにより線幅を振幅分広げることで、より深い領域までレーザ光を到達させることが可能となる。波状パターンと直線パターンによるレーザ切断加工時は、レーザの焦点をウエハの厚みの中心に合わせた。

レーザドーピング時の走査条件を Figure 4.4(b)に示す。センサ構造体を 60°傾けてドーパント溶液に完全に浸漬し、センサチップ側面と表面のピエゾ抵抗層の領域に対して、根元から先端方向にレーザを等間隔で照射した。側面および表面にピエゾ抵抗層を形成するためのドーパント供給方法として、第3章で用いた固相ドーパントの利用も考えられる。しかし、ウエハのような平面構造とは異なり、すでにウエハから切り出されたセンサ構造体に対しては、側面および表面への均一な SOD 塗布と、ドーパント源となる被膜の焼成は困難である。また、ドーパントガスを用いたレーザドーピングは、レーザ照射と同時に用いるためのチャンバ構成が複雑となる。これに対し、ドーパント溶液を用いた液浸レーザドーピングは、簡易なチャンバを用いてセンサチップを浸漬させるだけで、センサ構造の側面と表面に対して直接ドーパントを供給できる。そのため本章では液浸ドーピングを採用した。一方、側面に形成したピエゾ抵抗層は、表面に形成した配線用ピエゾ抵抗層と電気的に接続する必要があるため、レーザ照射時には表面および側面の両方にレーザが連続して照射される必要がある。そこで本研究では、センサチ

 第4章 液浸側面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー

チップを傾斜させた状態でレーザを照射した。一般的に、レーザ加工では照射対象に対してレーザを垂直に照射することで、加工寸法および加工条件が安定し、高い再現性が得られる。これは、照射対象の傾きによるスポット形状の変化や、面内方向の照射位置変化に起因するデフォーカス量の変動が生じず、スポット面積が一定に保たれるため出力密度が一定となるからである。これを踏まえ、本研究では、側面を表面と比較してより水平に近づけることで、側面に形成されるピエゾ抵抗層の均一性を高めることを目的として、センサチップの傾斜角度を 60° と設定した。センサチップの傾斜には、 60° の斜面を有する専用の土台を用いた。センサチップへの傾斜したレーザ照射を実現する他の方法として、回転軸を用いる手法、あるいは光学系にミラーを導入して照射方向を変更する手法も考えられる。回転軸を用いる手法は、照射角度を連続的に制御できる利点を有する一方で、液浸環境下での運用が困難である。また、ミラーなどの光学系を用いた斜入射照射では、レーザが液面に斜めに入射するため、ドーパント溶液表面での屈折の影響により照射位置の精密な制御が困難となる。これらを踏まえ、本研究では、液浸環境下において安定したレーザドーピングを実現するため、傾斜した土台を用いた。なお、液浸という制約がない場合には、多軸の傾斜ステージを用いることで、形状に依らず多面へのドーピングが可能であると考えられる。本章では、液面とデバイス側面の中心との垂直距離が約 1.5 mm になるように調整した。レーザの走査間隔は、側面照射時には $4\text{ }\mu\text{m}$ 、表面照射時には $2.5\text{ }\mu\text{m}$ とし、デバイス側面および表面いずれの領域でも実効的に約 $5\text{ }\mu\text{m}$ の間隔でレーザが照射されるよう設定した。側面ドーピング時には、センサチップ上端から液中に向けて 1.3 mm の位置に焦点が位置するように調整し、表面ドーピング時には、上端から 0.6 mm の位置に焦点が位置するように調整した。

続いて、液浸レーザドーピング時の平均出力密度とフルエンスを概算する。Figure 4.4(c)に液面、レーザの焦点とレーザ照射位置の幾何学的関係を示す。レーザビームは大気中から液面に垂直に入射し、傾けて配置したセンサチップに照射される。傾斜面に対してレーザを照射するため、面内方向の照射位置の変化に伴い、照射点の深さ方向位置が変化する。その結果、デフォーカス量が変化し、これに起因するウエスト径の変化に加え、屈折率変化によるウエスト径変化と、傾斜面への照射によりスポット形状が楕円状に変化することも考慮する必要がある。

まず、液中の照射位置におけるレーザのビーム半径を求める。レーザが屈折率 n_{liq} をもつ媒質中で照射される場合、その波長は n_{liq} 倍だけ短くなるため、ビームのウエスト径も大気中と比較し同様に n_{liq} 倍だけ小さくなる。よって、液中でのウエスト半径 $w_{0,\text{liq}}$ は、大気中で集光した場合のウエスト半径を $w_{0,\text{air}}$ とした場合、次式で表される。

 第4章 液浸側面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー

$$w_{0,\text{liq}} = w_0/n_{\text{liq}} \quad (4.1)$$

また、液中でのレイリー長 $z_{R,\text{liq}}$ は、式(3.10)に示した大気中のレイリー長 z_R を用いて、次式で表される。

$$z_{R,\text{liq}} = \frac{n_{\text{liq}}\pi(w_{0,\text{liq}})^2}{\lambda M^2} = \frac{z_R}{n_{\text{liq}}} \quad (4.2)$$

液中のレイリー長を用いることで、液中の焦点位置から Δh だけデフォーカスした位置におけるビーム半径を求めることができる。液面から焦点までの距離を h_i 、液面からターゲットまでの距離を h_s とすると、デフォーカス量 Δh は次式で表される。

$$\Delta h = h - h_0 \quad (4.3)$$

よって液中の照射位置における、傾斜によるビーム形状の楕円状変化を考慮していないビーム半径 $w_{\text{liq}}(h_s)$ は以下の式で表される。

$$w_{\text{liq}}(h_s) = w_{0,\text{liq}} \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta h}{z_{R,\text{liq}}}\right)^2} \quad (4.4)$$

次に、レーザが液中を伝播する際のエネルギー損失を求める。レーザが液面に垂直に入射すると仮定すると、液面での反射率 $R_{\text{liq,surf}}$ は垂直入射に対する Fresnel の式により次式で表される。

$$R_{\text{liq,surf}} = \left(\frac{n_{\text{air}} - n_{\text{liq}}}{n_{\text{air}} + n_{\text{liq}}}\right)^2 \quad (4.5)$$

よって、液面での透過率 $T_{\text{liq,surf}}$ は次式で表される。

$$T_{\text{liq,surf}} = 1 - R_{\text{liq,surf}} \quad (4.6)$$

さらに、液中の透過率である T_{liq} は、液体の吸収係数 α_{liq} を用いて以下の式で表される。

$$T_{\text{liq}} = e^{-\alpha_{\text{liq}} h_s} \quad (4.7)$$

よって、液中での全透過率 $T_{\text{liq,total}}$ は以下の式で表される。

$$T_{\text{liq,total}} = T_{\text{liq}} T_{\text{liq,surf}} \quad (4.8)$$

よって、液中の照射位置でのレーザ平均出力 $P_{\text{avg,liq}}(h_s)$ は、大気中のレーザ平均出力 P_{avg} を用いて、以下の式で表される。

 第4章 液浸側面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー

$$P_{\text{avg,liq}}(h_s) = P_{\text{avg}} T_{\text{liq,total}} \quad (4.9)$$

照射面では傾きによって傾きと並行方向のスポット径が増加するため，表面が水平面から θ だけ傾いている場合，スポット面積 $A_{\text{liq}}(h_s, \theta)$ は次式で表される．

$$A_{\text{liq}}(h_s, \theta) = \frac{\pi(w_{\text{liq}}(h_s))^2}{\cos \theta} \quad (4.10)$$

よって，平均出力密度 $I_{\text{liq}}(h_s, \theta)$ とフルエンス $F_{\text{liq}}(h_s, \theta)$ は以下の式で表される．

$$I_{\text{liq}}(h_s, \theta) = \frac{2P_{\text{avg,liq}}(h_s)}{A_{\text{liq}}(h_s, \theta)} \quad (4.11)$$

$$F_{\text{liq}}(h_s, \theta) = \frac{I_{\text{liq}}(h_s, \theta)}{f_{\text{rep}}} \quad (4.12)$$

概算された各加工工程におけるスポット半径，平均出力密度とフルエンス及びドーパント溶液の透過率 $T_{\text{liq,total}}$ は Table 4.2 の通りになった．ただし，液中におけるスポット径は，長辺と短辺があるため，短辺×長辺と記述する．レーザ切断時の平均出力密度とフルエンスの概算には式(3.18)と式(3.19)を用い，照射位置がウエハの表面から裏面まで変化するため，デフォーカス位置 z' は -0.3 mm から 0.3 mm の範囲で変動するとした．また，側面へのレーザドーピング時は，前述の照射位置の幾何学的な位置関係より $h_f = 2.65$ mm, $\theta = 30^\circ$ となる．この時，側面ピエゾ抵抗層の傾斜方向の寸法より， h_s は 1.36 mm から 1.63 mm となる．同様に，表面へのレーザドーピング時は， $h_f = 1.96$ mm, $\theta = 60^\circ$ となり，側面ピエゾ抵抗層よりも斜面方向の寸法が大きいため， h_s は 1.36 mm から 2.92 mm となる．また，ドーパント溶液にはリン酸(H_3PO_4)の 85% 水溶液を用いたため，屈折率と吸収係数はそれぞれ， $n_{\text{liq}} = 1.45$, $\alpha_{\text{liq}} = 0.25 \text{ cm}^{-1}$ とした [74]．

パルスあたりのエネルギーで比較すると，波状パターンを用いて切断条件では，直線パター

Table 4.2 各工程におけるスポット半径，平均出力密度，フルエンスおよび透過率．

Process	Spot radius [μm]	Average power density [MW/cm^2]	Fluence [J/cm^2]	$T_{\text{liq,total}}$ [%]
Cutting (wobbling)	13.5 – 17.1	6.5 – 10.4	65 – 104	-
Cutting (straight-line)	13.5 – 17.1	6.5 – 10.4	325 – 520	-
Doping (sidewall)	37.0×42.7 – 46.3×53.4	0.325 – 0.504	32.5 – 50.4	92.8 – 93.4
Doping (surface)	9.31×18.6 – 35.0×70.0	0.315 – 4.56	31.5 – 456	89.8 – 92.0

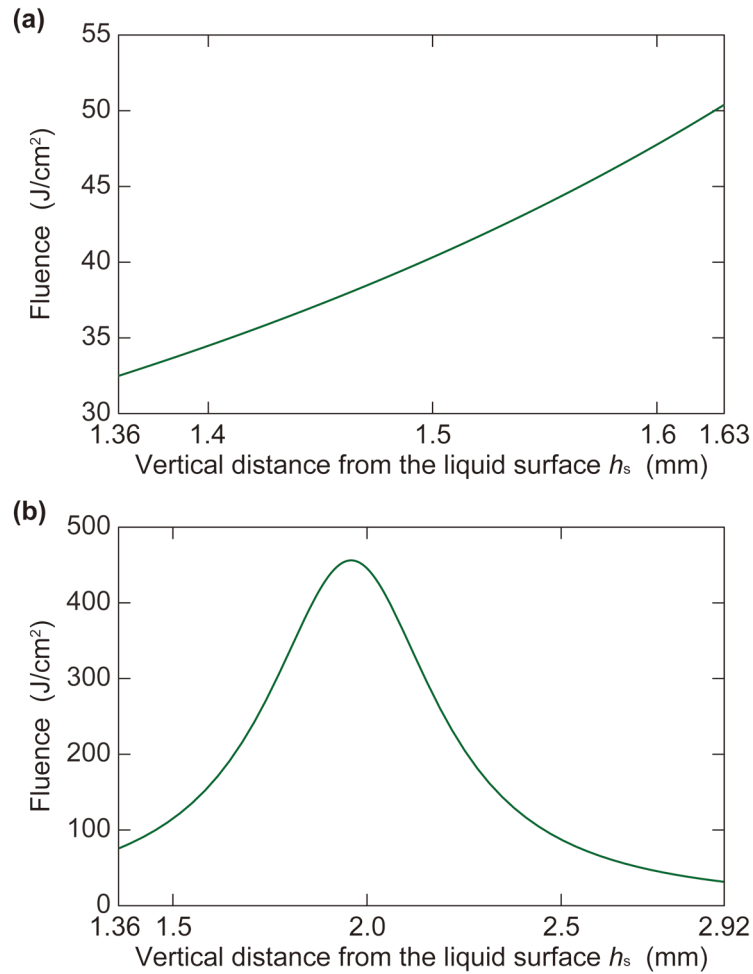


Figure 4.5 各抵抗における垂直方向の照射位置とフルエンスの関係. (a) 側面ピエゾ抵抗. (b) 表面ピエゾ抵抗.

ンと比較し、フルエンスが $1/5$ から $1/10$ 程度に減少している. この結果、1 パルスあたりのウエハに与えるダメージを抑制しつつ、高速での波状走査によって、直線パターンよりも厚いウエハの切断が可能となった. 液浸ドーピングにおいては、表中に示した透過率より、レーザ出力の 90%程度がウエハ表面に到達していることが確認できる. この時、透過率は照射位置が液中深くに位置するにつれて増加している. また、表中のフルエンスに関して、垂直方向の照射位置 h_s との関係を Figure 4.5 に示す. 照射位置の変化によって、フルエンスが変化していることが確認できる. この変化は前述の通り、デフォーカス量変化によるスポット径の変化に加え、液面からの距離に応じて透過率が減少することに起因する. 側面ドーピングに関しては、照射面に対して、フォーカス位置の方が液面から遠い位置にある. そのため、液面に最も近いエッ

 第 4 章 液浸側面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー

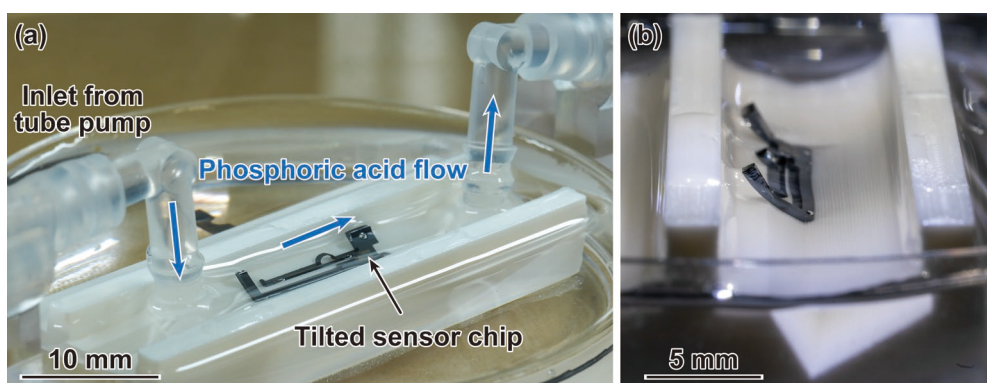


Figure 4.6 液浸レーザドーピングに使用したチャンバ. (a) チャンバ全体の写真. (b) チャンバ側面方向からの写真.

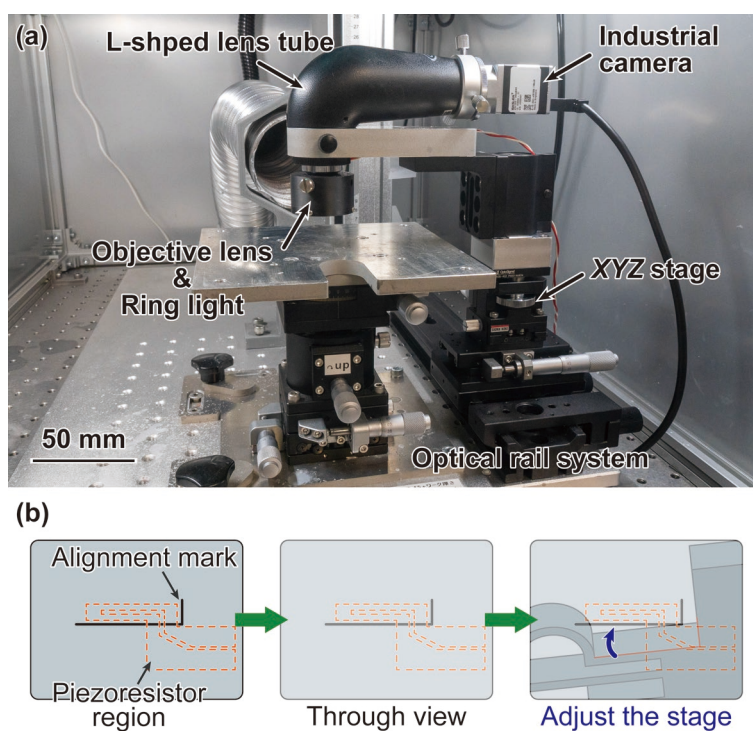


Figure 4.7 レーザ加工機内に設置したアライメントシステム. (a) アライメントシステムの写真. (b) アライメント手順の模式図.

ジの位置である $h_s = 1.36 \text{ mm}$ の位置において、スポット径が最大となり、フルエンスが最低となる。一方、フォーカス位置に最も近い側面ピエゾ抵抗層下端ではスポット径が最小となり、フルエンスが最大となる。この時、フルエンスは第 3 章における表面ドーピング時の値と比較

第4章 液浸側面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー

し、2.4 倍から 3.7 倍程度に増加している。表面への照射条件においては、広い領域を照射するために、デフォーカス量が -0.65 mm から 0.96 mm の範囲で変動する。フォーカス位置に相当する $h_s = 1.92\text{ mm}$ ではスポット径が最小となり、フルエンスが最大となる。これに対し、フォーカス位置から最も遠い表面ピエゾ抵抗層の下端の $h_s = 2.92\text{ mm}$ では、スポット径が最大となりフルエンスが最小となる。その結果、表面ピエゾ抵抗内には、フルエンスが側面ピエゾ抵抗における最小フルエンスと同程度の領域と、その領域と比較し 15 倍程度のフルエンスの領域が存在する。表面ピエゾ抵抗は、電極パッド領域として用いられるため、電極によって導通が確保される限り、抵抗値の不均一性はある程度許容される。しかし、均一なピエゾ抵抗層を形成するという観点では、このようなフルエンス分布は必ずしも適切とは言えない。

次に、本章での液浸ドーピングに使用した特注チャンバとアライメントシステムについて説明する。Figure 4.6(a)に、液浸レーザドーピングに用いたカスタムチャンバの写真を示す。チャンバ内部には傾斜をもつ治具が設置されており、この治具上にセンサチップを配置する。治具は 3D プリンタ(Ultimaker S5, Ultimaker B. V.)で製作したポリ乳酸製であり、ドーパント溶液に用いた H_3PO_4 水溶液に耐性がある。また、チューブポンプ(AC-2120, Atto Corp.)を用いてドーパント溶液を循環させることで、ドーピング中に発生する気泡をセンサチップ上部から取り除き、ドーピングの均一性を高めた。この時、溶液の循環方向は、ピエゾ抵抗層の先端から根元の向きであった。Figure 4.6(b)にセンサ構造体を置いた状態でチャンバを横から撮影した写真を示す。センサチップを治具上に配置することで、傾斜角 60° の斜面に沿ってセンサチップが保持され、液面からの距離も適切な位置に自動的に定まるようになっている。

Figure 4.7(a)に、傾けたチップに対してアライメントしてレーザを照射するために使用したアライメントシステムの写真を示す。小型の工業用カメラ(a2A1920-160ucBAS, Basler AG)と 5 倍の対物レンズが組み込まれた L 字鏡筒(TS-L-1-20-6, CHUO PRECISION INDUSTRIAL Co., Ltd.)によって、レーザ加工機のレンズの下にある、センサチップやダミーウエハを拡大して観察できるようになっている。また、アライメントシステムに組み込まれている精密 XYZ ステージによって、カメラの位置調整および対象物との距離調整によってピントを適切に合わせることができる。さらに、これらのシステムは光学レール上に設置されており、観察時はレーザ加工機の下へ、レーザ加工時にはレンズの加工エリア外へ移動させることができる。アライメント手順を Figure 4.7(b)に示す。まず、ダミーの Si ウエハに対して、レーザ加工でアライメント用マークを形成し、ピエゾ抵抗層の加工位置を確認する。アライメントマークには、センサチップを傾けて配置した際の表面と側面の境界に位置するエッジと、そのエッジと直交する土台構造のエッジとアライメントするための、L 字のマークを採用した。次に、アライメントマークを

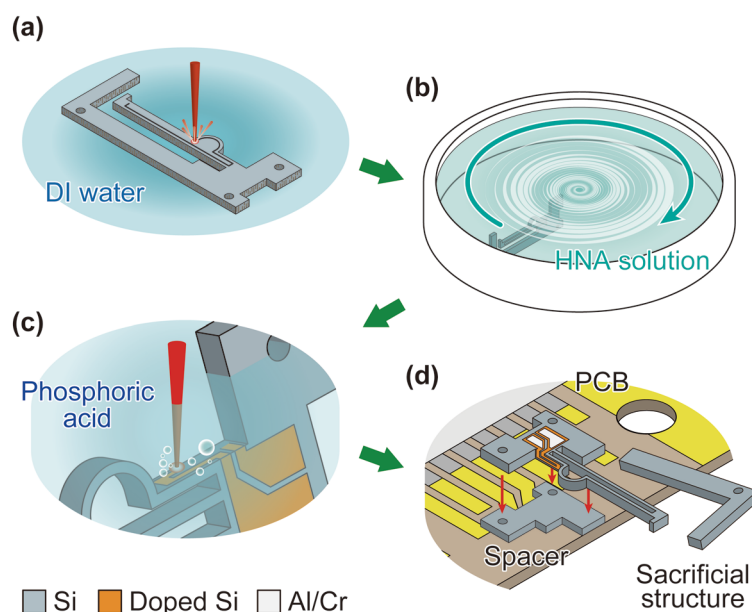


Figure 4.8 提案するセンサの製作プロセス. (a) Si ウエハからセンサ構造体の切り出し. (b) HNA エッチングによるデブリ除去と側面粗さの低減. (c) 液浸側面レーザドーピングによる側面ピエゾ抵抗層の形成. (d) PCB への接続.

カメラで撮影し、透過画像として表示する. その後、カメラ位置を固定したまま、センサチップを設置したチャンバをレーザ加工機側の $XYZ\theta$ ステージで移動させ、アライメントマークとセンサチップのエッジの位置と角度を一致させる. 最後に、アライメントシステムをレンズの下から移動させ、チャンバの高さを調整した後に、レーザを照射しドーピングを行う.

4.3.2 製作プロセス

Figure 4.8 に、提案するセンサの製作プロセスを示す. センサの材料には、厚さ $625\ \mu\text{m}$ 、比抵抗 $1\text{--}20\ \Omega\cdot\text{cm}$ の B がドーピングされた p 型の片面鏡面研磨で、両面に $1\ \mu\text{m}$ ずつ酸化膜が形成された Si ウエハ(Matsuzaki Seisakusyo Co., Ltd.)を用いた. 酸化膜はレーザ切断時のデブリが直接 Si 基板上に付着することを防ぐための保護膜としての役割を果たす. まず、前述の条件でレーザ照射を行い、ウエハからセンサの基材となるセンサ構造体を切り出した(Figure 4.8(a)). 切断加工時は、ウエハとウエハホルダーの間を純水で見たして冷却し、レーザ加工時の熱によるセンサ構造体の破損を防止した. この時の切断幅は、波状パターンによって約 $120\ \mu\text{m}$ になった. 次に、等方性の Si エッチャントである HF、硝酸(HNO_3)、酢酸(CH_3COOH)の混合溶液である HNA 溶液を用いて、保護膜としての酸化膜の除去、デバイス側面のデブリ除去および表面粗さの低

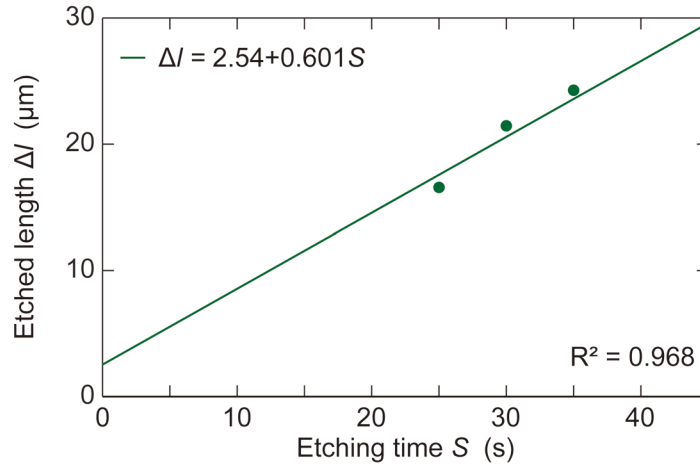


Figure 4.9 使用した HNA 溶液による Si ウエハのエッチレート.

減を行った(Figure 4.8(b)). HNA 溶液は, HNO_3 による Si 表面の酸化と HF による酸化膜除去の繰り返しによって, Si を高速で等方性にエッチングすることが知られている [90]. このエッチャントによる処理は, 先行研究においても, レーザ加工後の Si ウエハの側面粗さの改善に有効であることが報告されている [91]. 本研究のようにデバイス側面へドーピングを行う場合, 側面にデブリが付着している状態では適切にドーピングが行えない. そのため, Si ごとエッチングすることにより, デブリ除去としての役割も HNA 溶液によるエッチングは担っている. HNA 溶液の体積混合比は HF (48vol%), HNO_3 (70vol%), CH_3COOH (99.7vol%) を HF : HNO_3 : CH_3COOH = 2:7:1 で混合した. この条件下ではエッチングの反応が比較的緩やかに進行し, 鏡面状の表面と滑らかなエッジが得られることが知られている [92], [93]. エッチングは, チップを垂直に保持した状態で, 240 rpm で回転している溶液に 30 s 間浸すことで行った. 予備検討として行った, この混合比の HNA 溶液による Si のエッチレートを Figure 4.9 に示す. センサチップと同じウエハを材料として, $0.42 \text{ mm} \times 0.42 \text{ mm}$ の正方形の穴を開けた 5 mm 角のチップを複数製作した. これらのチップを 25, 30, 35, 45 s エッチングし, エッチング時間による穴の拡大量を計測することで, エッチングレートを概算した. エッチング時間を S , エッチングレートを Δl とした場合, その関係は以下の通りであった.

$$\Delta l = 2.54 + 0.601S \quad (4.13)$$

エッチング時間が 0 s の時, デブリを 48% の HF 洗浄後, 超音波洗浄によって可能な限り取り除いたが, 残存したデブリによって穴寸法が正確に計測できないことを考慮し, 切片を含む線形

 第 4 章 液浸側面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー

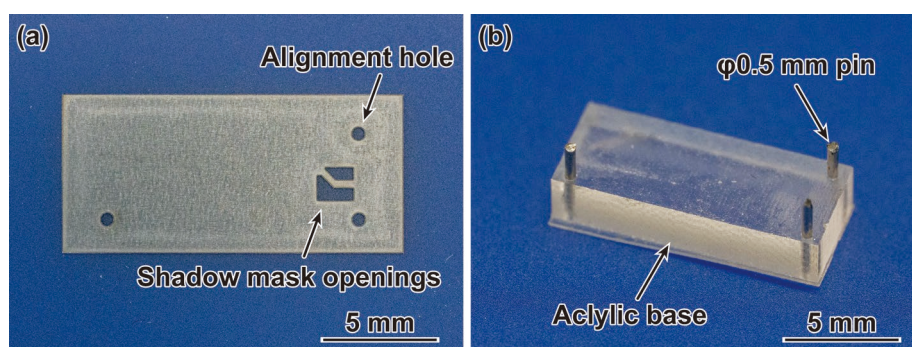


Figure 4.10 蒸着に利用した治具の写真. (a) Ti 製シャドウマスク. (b) センサ構造体とシャドウマスクを固定するための土台.

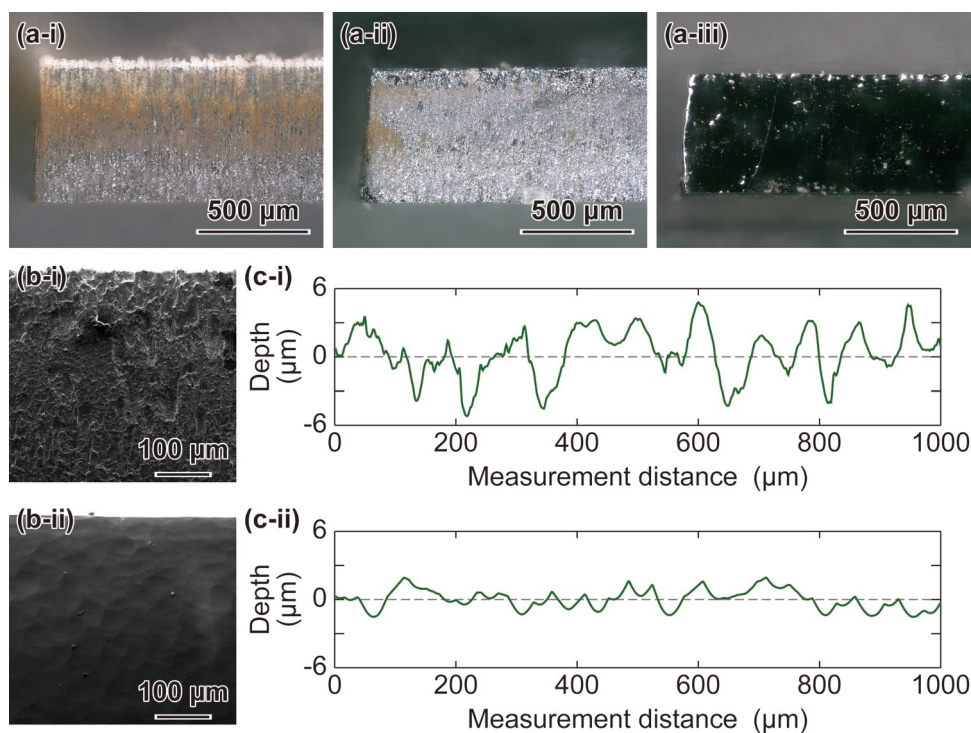


Figure 4.11 Si チップ側面の粗さの評価. (a) チップ側面の顕微鏡画像: (i) レーザ切断直後, (ii) デブリ除去後, (iii) ウェットエッチング後. (b) チップ側面の SEM 画像および, (c) 側面プロファイル: (i) デブリ除去後, (ii) ウェットエッチング後.

モデルで近似した. 式(4.13)より 1 min あたりのエッチング量は約 $39\text{ }\mu\text{m}$ であり, 文献値と概ね一致することを確認した [93]. したがって, 30 s のエッチングによって, カンチレバーの厚さ

第4章 液浸側面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー

や幅を含む全体寸法は等方的に約 41 μm 縮小した。続いて、前述の条件とチャンバを用いて液浸レーザドーピングを実施し、側面および表面の双方に同時にドーピングを行った(Figure 4.8(c))。ドーパント溶液には 85%の H_3PO_4 水溶液を用い、15 mL/min の速度で循環させた。その後、ピエゾ抵抗層が形成されたセンサ構造体を HF で洗浄し、シャドウマスクを用いて Cr/Al 層を蒸着して電極を形成した。Figure 4.10 に蒸着に利用した治具とシャドウマスクを示す。厚さ 2.5 mm のアクリル治具の角に直径 0.5 mm の金属ピンが立っている(Figure 4.10 (a))。このピンに、センサ構造体とシャドウマスクを通し、アライメントを行う。シャドウマスクは第3章と同様に厚さ 0.1 mm の Ti 板をファイバレーザで切り出すことで製作した(Figure 4.10 (b))。電極は、まず約 30 nm の Cr を密着層として、続いて約 200 nm の Al を導電層として蒸着した。最後に、厚さ 300 μm の Si 製のスペーサを介してエポキシ接着剤によってセンサチップを PCB に接着し(Figure 4.8(d))、ワイヤボンディングによって電気的な接続を行った。Si 製のスペーサはファイバレーザで厚さ 300 μm の Si ウエハを切断することで製作した。犠牲構造は、センサチップを PCB に接着した後に、ハーフカットラインに沿ってピンセットで折ることで取り除いた。また、ワイヤボンディングの際は接着力の強いボール側をセンサチップの電極にボンディングした。

4.3.3 側面粗さ低減量の評価

次に、ウェットエッチングによるデバイス側面粗さの低減効果を評価した。一連の評価には、エッチレートの算出に求めた Si チップを利用した。Figure 4.11(a)に、(i) レーザ切断直後、(ii) デブリ除去後および、(iii) ウェットエッチング後のチップ側面の顕微鏡画像を示す。Figure 4.11(a-i)より、レーザ切断後の側面には茶色いデブリが堆積していることが確認できる。これらのデブリは、切断時に熔融した Si や、熔融 Si が酸化して生成された Si の酸化物が再度付着したものと推測される。続いて、Figure 4.11(a-ii)には、HF 洗浄と超音波洗浄によってデブリのみを除去した側面を示す。この処理では表面粗さは改善されないため、ウェットエッチングによる粗さ低減効果を評価するための基準サンプルとして用いた。デブリが除去されているため Si の光沢は確認できるものの、切断に起因する微細な凹凸や傷が多数確認できる。Figure 4.11(a-iii)に、ウェットエッチング後の側面を示す。HNA エッチングによってデブリがほとんど除去されていることが確認できる。また、エッチングによって細かな凹凸や傷が消えていることも確認できる。ただし、顕微鏡画像では光の反射の影響により表面形状を明瞭に把握できないため、より高いコントラストで観察可能な SEM による観察を行った。Figure 4.11(b)に、(i)エッチング前および、(ii)エッチング後の側面の SEM 画像を示す。エッチング前には側面に、細かな傷や

 第4章 液浸側面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー

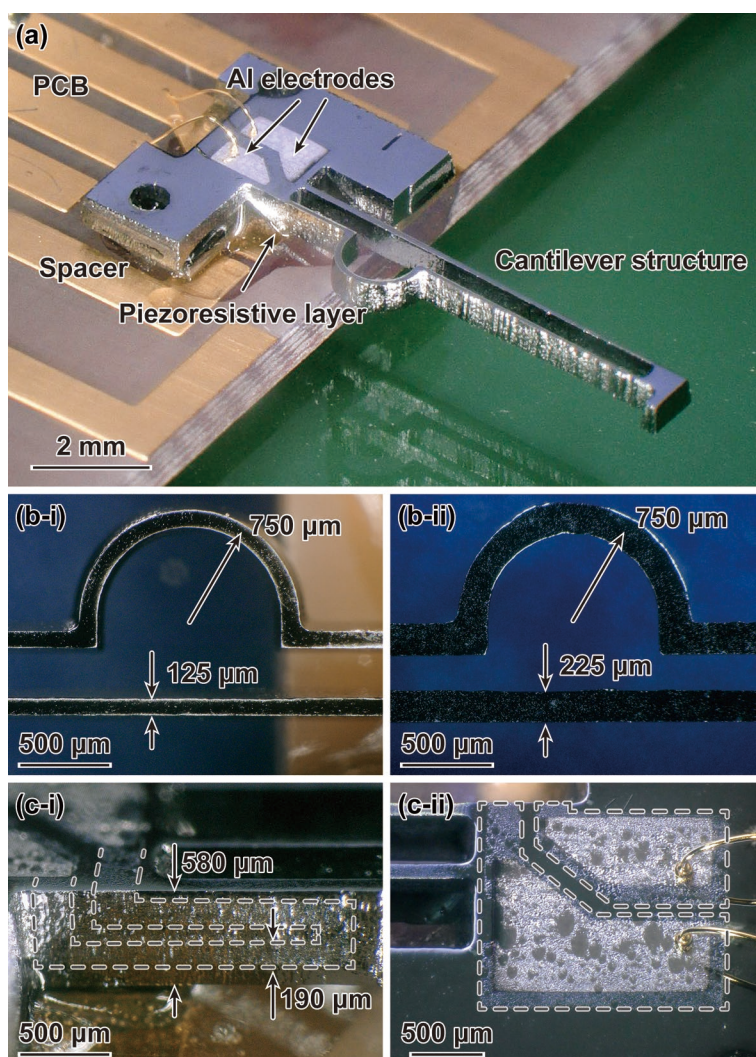


Figure 4.12 製作したセンサの顕微鏡写真. (a) PCB 上に実装されたセンサチップ. (b) 支持梁曲線部の(i) 表面, (ii) 裏面. (c-i) 側面ピエゾ抵抗層. (c-ii) 表面ピエゾ抵抗層と電極部.

穴が多数確認された. 一方, エッチング後の側面では, 等方性エッチングによって形成されたクレーター状の構造は確認されるものの, 傷や穴, デブリなどはほとんど見られなかった. 最後に, Figure 4.11(c)に, (i)エッチング前および, (ii)エッチング後の側面のプロファイルを示す. 各チップ側面の長手方向に沿って 1 mm の範囲のプロファイルを測定した. なお, エッチング前は細かく大きな段差が多数あるため非接触な計測である共焦点レーザ顕微鏡を, エッチング後は光の反射によって光学的な計測が困難であったため触針式段差計(Dektak XT, Bruker Corp.)を用いて表面粗さを計測した. エッチング前の算術平均粗さは $R_a = 1.7 \mu\text{m}$, 最大高さ粗さ $R_z = 10.0 \mu\text{m}$ であった. 一方, エッチング後には, $R_a = 0.69 \mu\text{m}$, $R_z = 3.5 \mu\text{m}$ に減少し, 表面粗さが

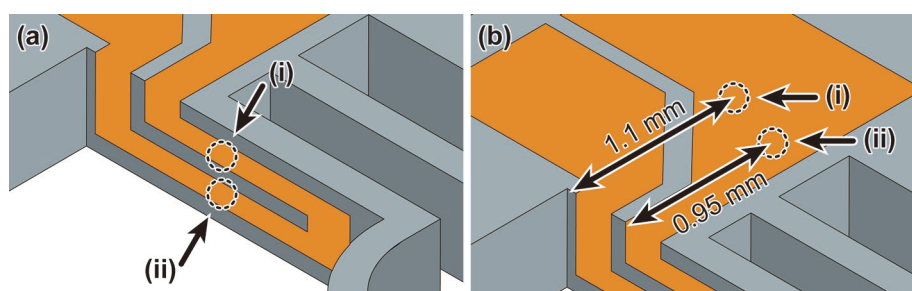


Figure 4.13 各ピエゾ抵抗層における組成評価の評価位置. (a) 側面ピエゾ抵抗における評価位置.
(b) 表面ピエゾ抵抗における評価位置.

初期値の半分以下に低減されたことが確認された。

4.3.4 製作したセンサの構造評価

Figure 4.12 に、製作したセンサの顕微鏡写真を示す。Figure 4.12(a)に示すように、センサチップはスペーサを介して PCB に固定されている。また、センサチップはレーザ加工によって、設計通りに製作されていることが確認できる。この時、センサチップ全体の厚みは $580\text{ }\mu\text{m}$ であった。さらに、PCB との接続に用いられる Au 線がピエゾ抵抗層上の Al 電極に剥離などなく接続されていることも確認できる。Figure 4.12(b-i)には支持梁曲線部の表面、Figure 4.12(b-ii)には支持梁曲線部の裏面の画像を示す。梁の表面の幅は、約 $125\text{ }\mu\text{m}$ 、裏面の幅は約 $225\text{ }\mu\text{m}$ であり、曲線部中心の曲率半径は $750\text{ }\mu\text{m}$ であった。このように、波状パターンによるレーザ切断の影響により、梁断面が台形形状となっていることが確認され、その斜面角度は垂直方向から 4.9° であった。Figure 4.12(c-i)に、側面ピエゾ抵抗層の拡大図を示す。HNA エッチングによって、デブリの除去と表面粗さが低減されていることが確認できる。また、ピエゾ抵抗層が形成されている領域は、レーザ照射による凹凸によって、若干の色が異なって見える。ピエゾ抵抗層はセンサチップ側面から表面へと連続して延びており、支持梁の厚さ方向内にアライメントされパターンニングされている。この時、側面ピエゾ抵抗層の幅は約 $190\text{ }\mu\text{m}$ であり、設計値とほぼ一致していた。Figure 4.12(c-ii)には、表面ピエゾ抵抗層と電極の画像を示す。表面ピエゾ抵抗層が形成されている領域は、レーザ照射による凹凸によって、色が白く見えることが確認できる。また、表面ピエゾ抵抗層が概ね設計通りに製作されていることと、Al 電極が電極パッド領域内にアライメントされて形成されていることが確認できる。一方で、表面ピエゾ抵抗層には気泡の発生によりレーザ照射が十分に当たらなかったと予想される変色のない領域も一部に確認された。

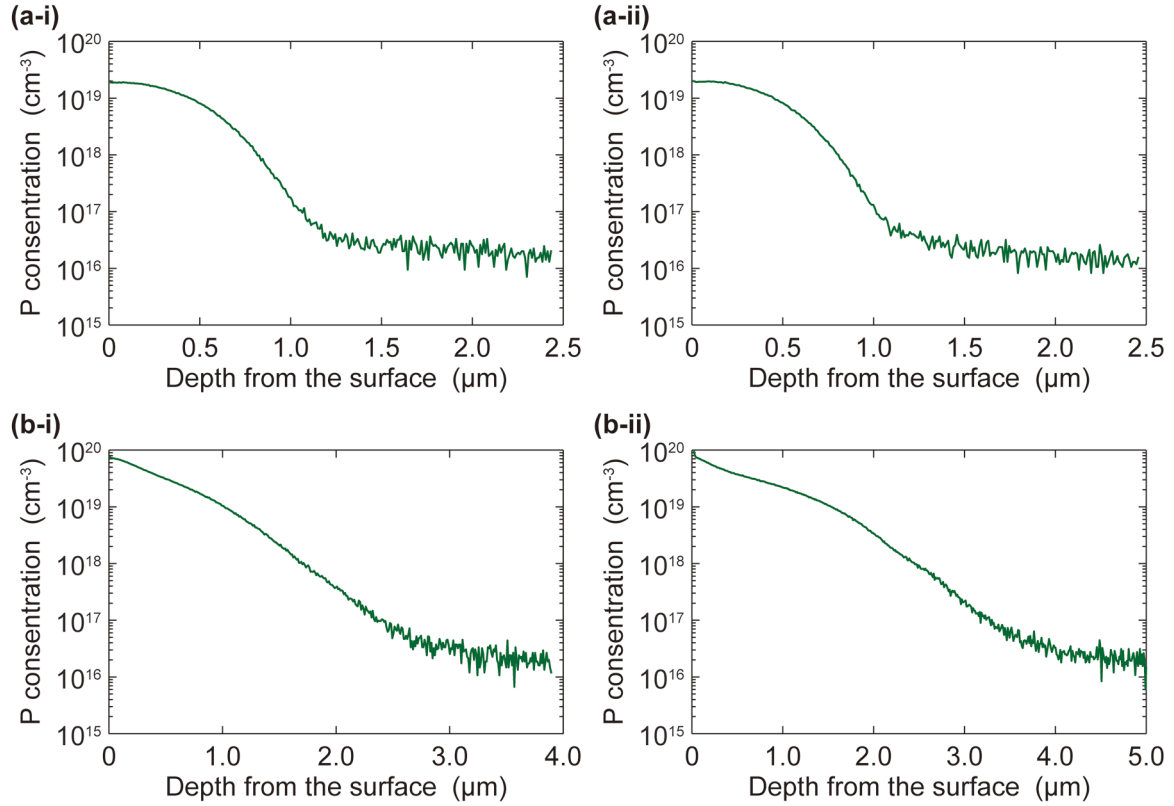


Figure 4.14 ピエゾ抵抗層の表面からの深さに対する P 濃度のプロファイル. (a) 側面ピエゾ抵抗層. (b) 表面ピエゾ抵抗層. (i)はそれぞれの領域(i), (ii)はそれぞれの領域(ii)における P 濃度プロファイルを示す.

4.3.5 ピエゾ抵抗層の組成および結晶性評価

次に、液浸レーザドーピングによって形成した、ピエゾ抵抗層の組成および結晶性について評価した。Figure 4.13 に、各ピエゾ抵抗層における組成評価の評価位置を示す。Figure 4.13(a)に示すように、U 字形に形成された側面ピエゾ抵抗のひずみ検知領域において、表面側を領域(i)、裏面側を領域(ii)と定義する。この時、液面からのレーザ照射距離 h に換算するとそれぞれ、 $h_s = 1.43 \text{ mm}$, $h_s = 1.58 \text{ mm}$ となり、領域(ii)の方が焦点位置に近くフルエンスが大きくなる。条件より計算されるフルエンスは、それぞれ $F_{\text{liq}} = 36.1 \text{ J/cm}^2$, $F_{\text{liq}} = 46.1 \text{ J/cm}^2$ となり、領域(ii)の方が 1.3 倍程度大きくなる。一方、表面ピエゾ抵抗においては Figure 4.13(b)に示すように、センサチップのエッジから約 1.1 mm の位置を領域(i)、エッジから約 0.95 mm の位置を領域(ii)と定

 第4章 液浸側面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー

義する．この時，液面からのレーザ照射距離 h に換算するとそれぞれ， $h_s = 2.32 \text{ mm}$ ， $h_s = 2.18 \text{ mm}$ となり，領域(ii)の方が焦点距離に近くフルエンスが大きくなる．条件より計算されるフルエンスは，それぞれ $F_{\text{liq}} = 160 \text{ J/cm}^2$ ， $F_{\text{liq}} = 267 \text{ J/cm}^2$ となり，領域(ii)の方が 1.7 倍程度大きく，側面ピエゾ抵抗の 7 倍程度大きい．

Figure 4.14 に，D-SIMS を用いて測定したピエゾ抵抗層の P 濃度の深さ方向プロファイルを示す．液浸レーザドーピングによって形成した，側面ピエゾ抵抗層と表面ピエゾ抵抗層の両方について測定を行った．Figure 4.14(a)に，側面ピエゾ抵抗層の SIMS プロファイルを示す．領域(i)の結果を(a-i)に，領域(ii)の結果を(a-ii)に示した．どちらの結果においても，ピエゾ抵抗層表面付近では P 濃度が $2.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 程度の比較的高い値を示した．濃度は表面から約 $0.5 \mu\text{m}$ の深さまで約 10^{19} cm^{-3} を維持し，それより深い領域では P 濃度が急激に減少した．約 $1 \mu\text{m}$ の深さでは濃度が約 10^{17} cm^{-3} を下回り，それ以降はすぐにバックグラウンドレベルに到達して検出限界となった．表面側と裏面側で濃度分布に大きな差は見られなかったが，裏側の方がわずかに深い領域まで，約 10^{19} cm^{-3} の濃度を維持していた．詳細なドーピング深さに関しては，次節で示す電気的特性の結果と併せて検討する．一方で，3 章で形成した表面ピエゾ抵抗層は，表面での濃度が約 10^{20} cm^{-3} で推定した有効深さである $2.7 \mu\text{m}$ 程度では約 10^{18} cm^{-3} ，バックグラウンドレベルの約 10^{17} cm^{-3} に到達するのは約 $4 \mu\text{m}$ の深さであった．すなわち，表面濃度はおよそ 10 倍，ドーピング深さは約 4 倍であった．フルエンスは本章の液浸ドーピングの方が前章の表面ドーピングの 2 倍高いものの，ドーピング深さや濃度はむしろ減少していた．ドーピング深さに関しては，照射面が傾斜していることによる Fresnel 反射の増加によって吸収されるエネルギーが低下したことに加え，液中照射では吸収した熱エネルギーが液体側へ散逸するため，実際に Si に吸収されるエネルギーが前章の表面照射より小さくなり，熔融層の深さが増加しなかったことが推測される．ドーピング濃度に関しては，吸収されるエネルギー量の他に，前章で使用した SOD と比較し本章で使用したドーパント溶液の方がドーパント供給量が少なく，濃度が減少したと考えられる．続いて，Figure 4.14(b)に，表面ピエゾ抵抗層の SIMS プロファイルを示す．測定箇所は 2 か所あり，表面ピエゾ抵抗層の内，領域(i)の結果を(b-i)に，領域(ii)の結果を(b-ii)に示した．どちらのピエゾ抵抗層においても，表面付近では P 濃度が 10^{20} cm^{-3} 程度の高い値を示した．濃度は表面から徐々に減少し，表面ピエゾ抵抗層下端の方は約 $3 \mu\text{m}$ の深さでは濃度が 10^{16} cm^{-3} 程度になりバックグラウンドレベルに，表面ピエゾ抵抗層中央の方は約 $4 \mu\text{m}$ の深さでは濃度が 10^{16} cm^{-3} 程度になりバックグラウンドレベル到達した．Si 表面へ到達するエネルギーが多い方が，Si の熔融量が増えることで，表面濃度とドーピング深さが増大したと考えられる．

次に，透過型電子顕微鏡(Tecnai Osiris, FEI Co.)を用いて，ピエゾ抵抗層の断面 TEM 画像を撮

 第 4 章 液浸側面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー

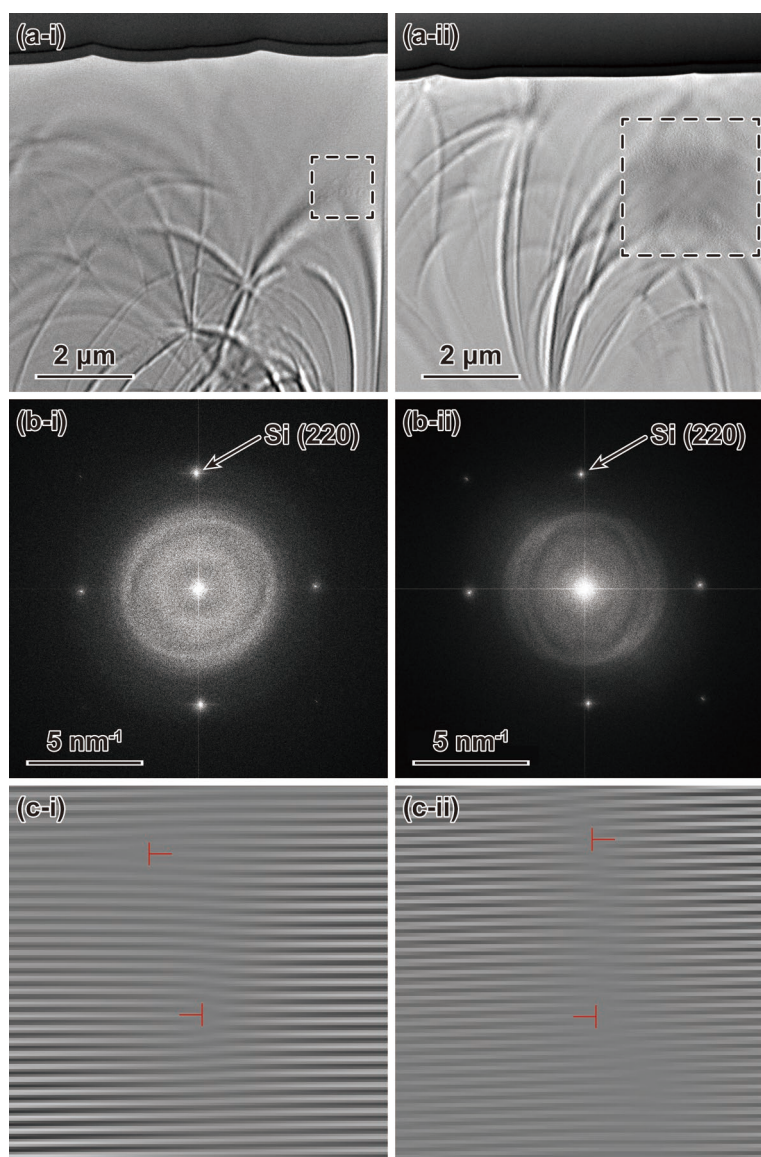


Figure 4.15 側面ピエゾ抵抗層の断面 TEM 画像. (a) TEM サンプル全体画像. (b) サンプル中のアモルファス領域から得られた FFT パターン. (c) (220)スポットから再構築した逆 FFT 像. それぞれについて, (i)は領域(i), (ii)は領域(ii)を示す.

影し, 結晶構造を評価した. Figure 4.15(a)に側面ピエゾ抵抗層のサンプル全体の断面 TEM 画像を示す. 以降, Figure 4.15 に関しては, (i)は領域(i), (ii)は領域(ii)を表す. 観察のため, 約 10 μm×6 μm の領域を薄膜化して試料を製作した. 図中の上側が, 側面ピエゾ抵抗層の表層側に対応している. どちらのサンプルにおいても, 下側から縞状のコントラストが確認されるが, これは試料の湾曲によるものである. サンプル全体を観察した結果, 亀裂や部分的に多結晶化し

 第4章 液浸側面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー

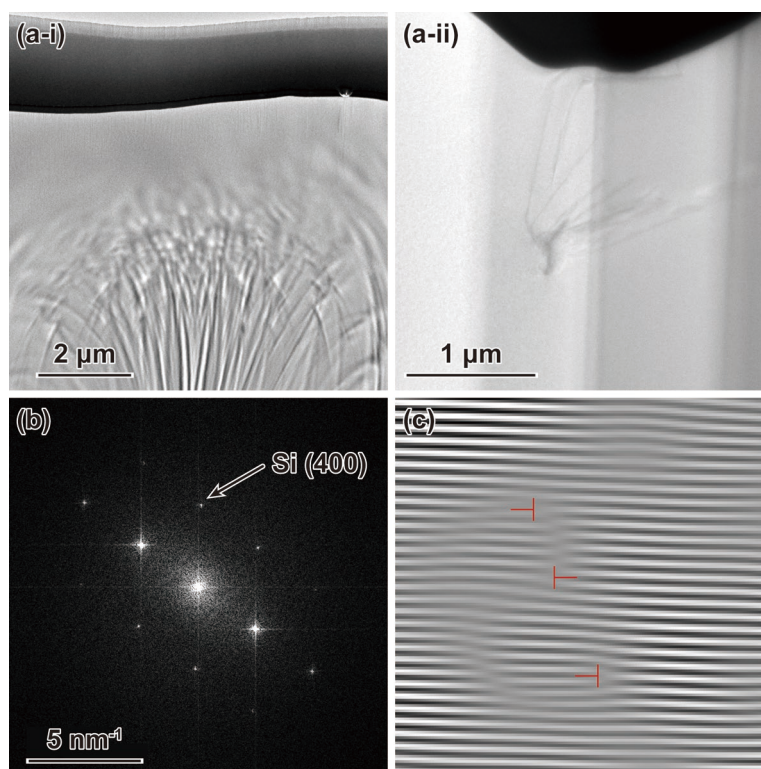


Figure 4.16 表面ピエゾ抵抗層の断面 TEM 画像. (a-i) TEM サンプル全体画像. (a-ii) 薄片サンプル領域外のクラックの拡大画像. (b) サンプルから得られた FFT パターン. (c) (400) スポットから再構築した逆 FFT 像.

ている領域は確認されなかった. しかし, 図中に四角で示した領域のように, 局所的に基板とコントラストが異なる領域が存在した. そこで, その領域の高解像度像に対して高速フーリエ変換(FFT)による解析を行った. Figure 4.15(b)に FFT パターンを示す. いずれの FFT パターンにおいても, 中心から四方の位置に明瞭なスポットが観察された. これらのスポットと中心のスポットとの距離が約 5.23 nm^{-1} であり, その逆数から求めた格子間隔は $1.91 \text{ \AA}$ となる. この値は Si の(220)反射に対応する面間隔と一致しており, 観察されたスポットが(220)回折に由来することを確認した. 側面ピエゾ抵抗層は(110)面上に形成されているため, この結果は, 想定される結晶方位と一致する. 一方, FFT パターンの中心にハロー状のパターンが確認され, これは特定の結晶方位を持たない領域に由来するものであり, レーザドーブ層が部分的にアモルファス化していることを示している. さらに, FFT パターンの(220)スポットを選択して逆 FFT 処理を行い, 対応する格子像を再構築した. Figure 4.15(c)に逆 FFT により再構築した格子像の拡大図を示す. この像より, $\langle 110 \rangle$ 方位の結晶領域中において, 転位が局所的に確認された. した

第4章 液浸側面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー

がって、本章の条件で行った液浸側面ドーピングにおいては、クラックなどの大きな欠陥は生じていないものの、Siの再結晶化過程において局所的なアモルファス化が発生すること、および基板の結晶方位と整合している領域においては転位が形成されることが確認された。

続いて、Figure 4.16(a-i)に表面ピエゾ抵抗層の断面 TEM 画像を示す。観察箇所は、表面ピエゾ抵抗層内においてフルエンスが高い中央の領域である。観察のため、約 $10\ \mu\text{m} \times 6\ \mu\text{m}$ の領域を薄膜化して試料を製作した。図中の上側が、表面ピエゾ抵抗層の表層側に対応している。下側から縞状のコントラストが確認されるが、これは試料の湾曲によるものである。サンプル全体を観察した結果、部分的に多結晶化やアモルファス化している領域は確認されなかった。しかし、薄片化した領域外にクラックを確認した。Figure 4.16(a-ii)に薄片サンプル領域外のクラックの拡大図を示す。図中に確認される縦線のコントラストは、厚みの違いによるものである。クラックのサイズは、約 $2\ \mu\text{m}$ 四方であり、サンプル表面まで進展している。次に、クラック周辺領域の高解像度像に対して FFT による解析を行った。FFT パターンを Figure 4.16(b)に示す。六角形状に明瞭なスポットが観察された。これらのスポット間距離が約 $3.57\ \text{nm}^{-1}$ であり、その逆数から求めた格子間隔は $2.80\ \text{\AA}$ となる。この値は Si の(400)反射に対応する面間隔の2倍となっており、観察されたスポットが(400)回折に由来することを確認した。表面ピエゾ抵抗層は(100)面上に形成されているため、この結果は、想定される結晶方位と一致する。一方、FFT パターンにアモルファスに由来するハロー状のパターンや多結晶に由来するリング状のパターンが確認されないことから、単結晶を維持していることが確認できる。さらに、FFT パターンの(400)スポットを選択して逆 FFT 処理を行い、対応する格子像を再構築した。Figure 4.16(c)に逆 FFT により再構築した格子像の拡大図を示す。この像より、 $\langle 100 \rangle$ 方位の結晶領域中において、転位が局所的に確認された。したがって、本章の条件で行った液浸表面ドーピングにおいては、Siの再結晶化過程における多結晶化やアモルファス化は発生しないものの、局所的にクラックなどの欠陥が生じることが確認された。

以上より、本章の条件で行った液浸側面レーザドーピングでは、照射エネルギーが一定値より低い場合、熔融深さが浅く、熔融 Si の温度上昇量も小さいため、Si 基板側からのエピタキシャル成長と、液面と接触している表面側からの固化とが競合し、局所的にアモルファス領域が残存すると考えられる。一方、照射エネルギーが一定値を超えると、熔融層が十分に形成され、熔融 Si の温度上昇量も大きくなる。その結果、表面側からの固化が進行する前にエピタキシャル成長が完了し、局所的なアモルファス領域は残存しないと考えられる。ただし、このような照射条件下では、急激な加熱および冷却に伴う体積変化や大きな温度勾配により高い熱応力が発生し、クラックが生じた可能性がある。

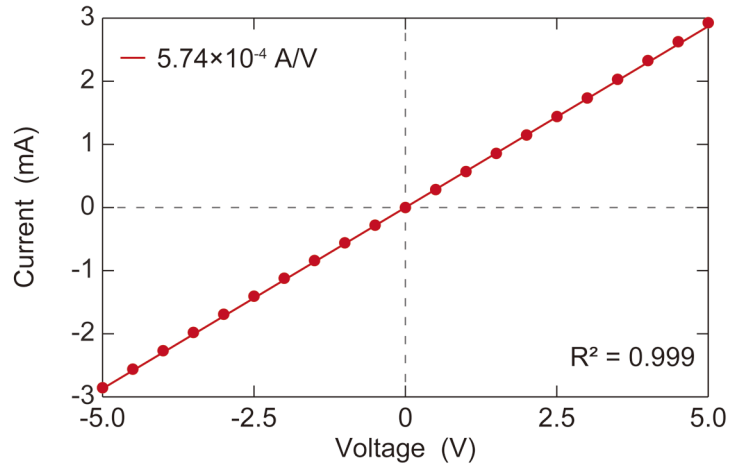


Figure 4.17 形成した側面ピエゾ抵抗層の電流電圧特性.

4.4 側面ピエゾ抵抗層の電气的特性評価

4.4.1 電流電圧特性の評価

液浸レーザドーピングによって形成した側面ピエゾ抵抗層を従来手法で形成した n 型のピエゾ抵抗と比較するため、電气的な特性を評価した。まずピエゾ抵抗層の I - V 特性を評価した。Figure 4.17 に -5 V から 5 V までの電圧掃引に対する電流応答を示す。 I - V 特性の計測は 3.4.1 節と同様に、四探針のソースメータを用いて室温で行った。図より、電流と電圧の間には線形な関係が見られ、最小二乗法による近似直線の傾きは $5.74 \times 10^{-4} \text{ A/V}$ であった。この結果から、ピエゾ抵抗層と電極層の接触は整流作用が無いオーミック接触であることが確認された。また、製作したピエゾ抵抗層の室温での初期抵抗値を R_1 と定義するとその値は $1.74 \text{ k}\Omega$ であった。デバイスの側面に形成されているピエゾ抵抗層の全領域の寸法は、幅 0.2 mm 、有効長さは約 3.55 mm であるため、実測シート抵抗は、 $98.1 \text{ }\Omega/\text{sq}$ と概算される。前章と同様の手法で、キャリアの活性化率 f_{pred} を求め、 $F(z_k) = 0.9$ を満たす有効ドーピング深さを算出した結果、 $f_{\text{pred}} = 0.497$ 、 $d_{\text{eff}} = 0.71 \text{ }\mu\text{m}$ となった。また、得られた有効ドーピング深さをを用いてピエゾ抵抗層の実効抵抗率 ρ_{eff} を算出すると、 $\rho_{\text{eff}} = 6.97 \times 10^{-3} \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ であった。この値は、前章で製作したピエゾ抵抗層と同程度の値となった。

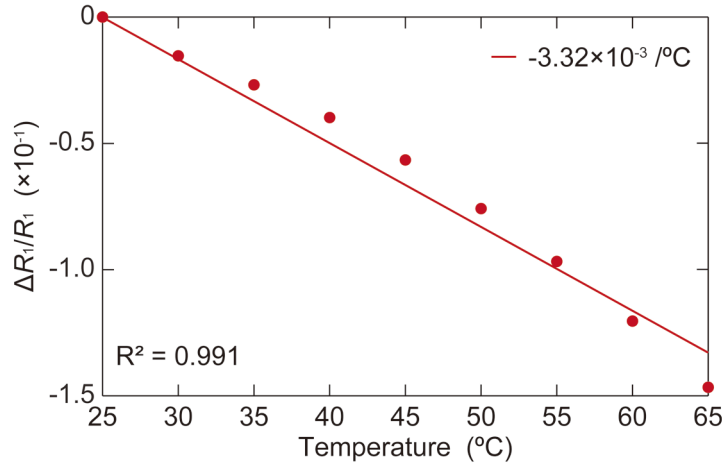


Figure 4.18 形成した側面ピエゾ抵抗層の温度特性.

4.4.2 温度特性の評価

続いて、液浸レーザドーピングによって形成した側面ピエゾ抵抗層の温度特性を評価した。3.4.2 節と同様の恒温槽を用い、温度を 25°C から 65°C まで 5°C 刻みで上昇させながらセンサの抵抗値をデジタルマルチメータにより測定した。Figure 4.18 に温度と抵抗変化率 $\Delta R_1/R_1$ の関係を示す。抵抗変化率は温度変化に伴って単調に減少したため、測定結果を一次近似することで抵抗の温度係数を算出した。この時、TCR は -3.32×10^3 ppm/°C であった。3.4.1 節でも述べたように、P 濃度がおおよそ 10^{19} cm^{-3} 程度の n 型 Si においては、室温付近の TCR は正の値を示すことが知られており、本実験結果と符号が異なっている [85]。これは、側面ピエゾ抵抗層内に部分的に形成されたアモルファス Si によるものと考えられる。

単結晶の n 型 Si では、温度上昇に伴いキャリア移動度が低下するため、抵抗は温度とともに増加し、TCR は正の値を示す。一方、アモルファス Si では原子配列が不規則であるためキャリアが局在しており、温度上昇に伴う熱エネルギーによって伝導に寄与するキャリアが増加するため、抵抗は減少し、負の TCR を示す。この時、アモルファス Si における導電率 σ_a は、活性化エネルギー E_a を用いて、以下の Arrhenius 型の式で表されることが知られている [94]。

$$\sigma_a(T) = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{k_B T}\right) \quad (4.14)$$

ここで、 k_B はボルツマン定数、 T は絶対温度である。この関係から分かるように、アモルファス Si においては、温度上昇に伴って導電率が増大し抵抗が減少するため、大きな負の TCR を

 第4章 液浸側面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー

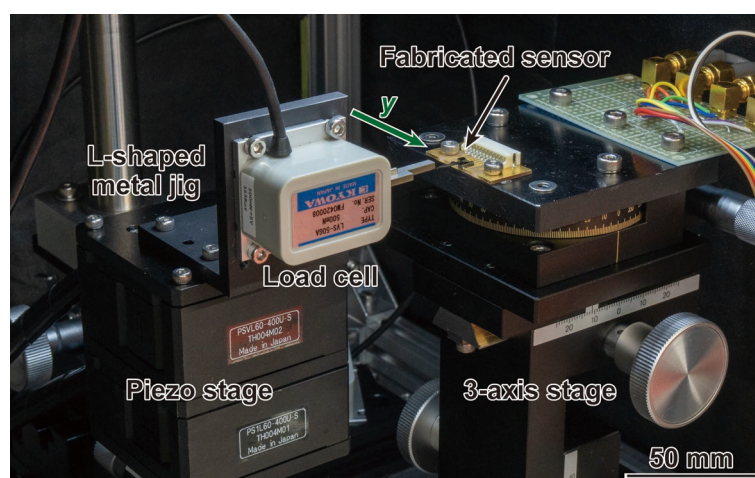


Figure 4.19 センサのばね定数測定のための実験セットアップの写真.

示す. また, その関係は指数関数的な関係を示す. 本章で形成した側面ピエゾ抵抗層は, 単結晶 Si 中にアモルファス Si が部分的に混在した構造であることが, 4.3.5 節の TEM 観察から確認されている. そのため, 単結晶 Si に由来の正の TCR 成分と, アモルファス Si 由来の負の TCR 成分が競合した結果, 本実験では非線形性を伴った負の TCR が支配的に観測されたものと考えられる. 実用化においては, 温度補償用の抵抗を追加し, 作動出力を取得することで, 従来のピエゾ抵抗型センサと同様の手法により温度ドリフトの補償が可能であると考えられる.

4.5 センサの機械的特性評価

4.5.1 ばね定数の評価

次に, 製作したセンサの機械的特性を評価した. センサのばね定数評価のためのセットアップを Figure 4.19 に示す. 使用した装置などは, 3.5.1 節と同様である. センサはステージ上に固定され, 反対側には定格容量が 500 mN のロードセル(LVS-50GA, KYOWA ELECTRONIC INSTRUMENTS Co., Ltd)を取り付けたピエゾステージを配置した. この時, ピエゾステージを水平方向に振動させた. また, ロードセルは筐体に対し垂直方向の力のみ計測できるため, L 字の金属治具を用いて, 90°傾けた状態でピエゾステージに固定した. そして, ロードセル先端にはカンチレバーに力を印加するための金属片を固定した. ロードセルとセンサの位置を調整し, ロードセル先端の金属片がカンチレバー先端に接触するように配置した後, ピエゾステージを駆動して y 軸方向に変位を与え, その時発生した力をロードセルを用いて計測した.

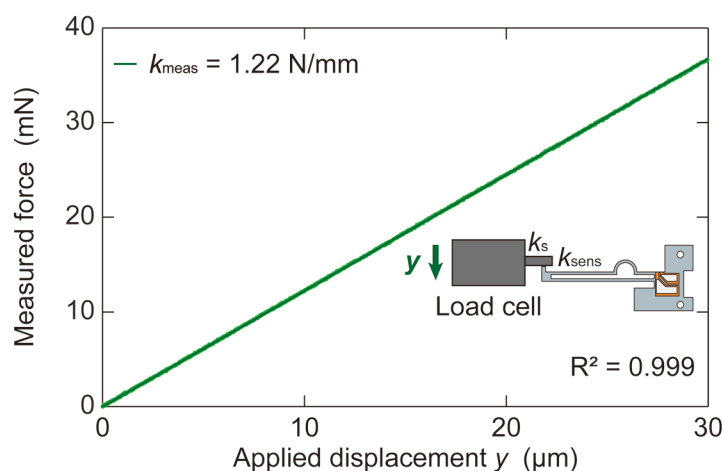


Figure 4.20 センサへ入力した面内方向の変位と計測された力の関係.

Figure 4.20 にピエゾステージの変位と測定された力の関係を示す．入力された $30\ \mu\text{m}$ までの変位に対して，力が線形に発生していることが確認できる．この時，計測された見かけのばね定数 k_{meas} は $1.22\ \text{N/mm}$ であった．また，実験セットアップである金属片を固定したロードセルのばね定数 k_s は $3.28\ \text{N/mm}$ であった．よって式(3.31)より，センサそのもののばね定数 k_{sens} は $1.95\ \text{N/mm}$ となった．シミュレーションから得られたばね定数は $1.89\ \text{N/mm}$ であり，シミュレーションとの差は約 3.2% であった．この差は，エッチング後のセンサチップにおいてエッジ部のフィレット半径が，FEM モデルで想定した値よりも大きくなったことにより，実デバイスの剛性が相対的に高くなったためであると考えられる．また，面内方向への力印加であったこと，そもそものセンサのばね定数が低いこと，PCB への接着面積が大きいことなどから，3.5.3 節のような接着剤によるばね定数の低下は確認されなかった．以上の結果より，センサへの入力変位は最大 $30\ \mu\text{m}$ まで，算出されたばね定数を用いて力に変換することが可能である．

4.5.2 共振周波数の評価

次に，センサの周波数特性を評価した．FEM シミュレーションにおいて，センサの第一次固有振動数は約 $5\ \text{kHz}$ であり，その振動方向が面内方向であることが確認された．また，センサの第二次固有振動数は約 $8\ \text{kHz}$ であり，その振動方向が面外方向であることが確認された．この結果に基づき， $1\ \text{kHz}$ から $10\ \text{kHz}$ の周波数範囲において，センサの面内方向と面外方向の周波数特性を評価した．使用したセットアップは 3.5.2 節と同様であり，センサを加振器に取り付け， $1\ \text{kHz}$ から $10\ \text{kHz}$ の周波数範囲の一定振幅の正弦波振動を加え，その際のセンサの面内方向

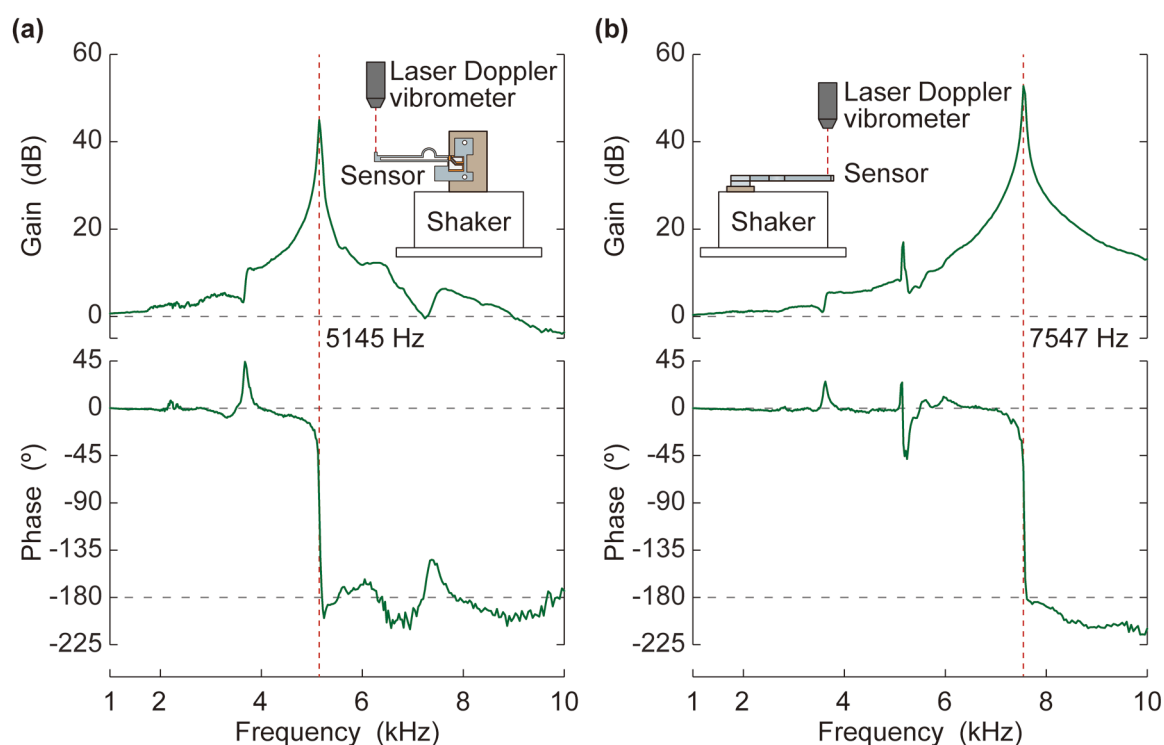


Figure 4.21 (a) センサの面内方向の周波数特性. (b) センサ面外方向の周波数特性.

と面外方向の振動をレーザドップラー振動計を用いて計測した. カンチレバーの面内方向の計測に関しては, 加振器の振動方向が一致するようにセンサを垂直に立てて固定した. ここで, 利得はカンチレバー底部の振動振幅に対するカンチレバー先端の振動振幅の比として定義した. Figure 4.21 にセンサの面内方向と面外方向の周波数特性を示す. 利得が最大となる周波数および位相シフトの位置より, カンチレバーの面内方向の共振周波数は 5.15 kHz であり, 面外方向の共振周波数は 7.55 kHz であった. また, 4 kHz 付近で観察される利得の低下は, どちらの加振方向の周波数特性でも確認されたためセットアップ固有の特性であることが予測される. FEM シミュレーションで得られた固有振動数と比較した場合, それぞれ, 約 3.4%と, -5.5%の差であるため, 製作されたデバイスは設計値と概ね一致していることが確認された. 面内方向での差は, ばね定数評価の場合と同様に, FEM モデルと比較して実デバイスの剛性が高かったことに起因すると考えられる. 一方, 面外方向における差は, 前章と同様に PCB への接着剤を用いた固定が原因であると考えられる. ただし, 前章と比較してセンサそのもののばね定数が低く, PCB への固定面積も広いため, その影響は少ないと言える. 以上の結果より, 第一次の共振周波数に基づけば, 製作したセンサは数 kHz 程度までの周波数範囲において力計測が可能であることが実験的に示された.

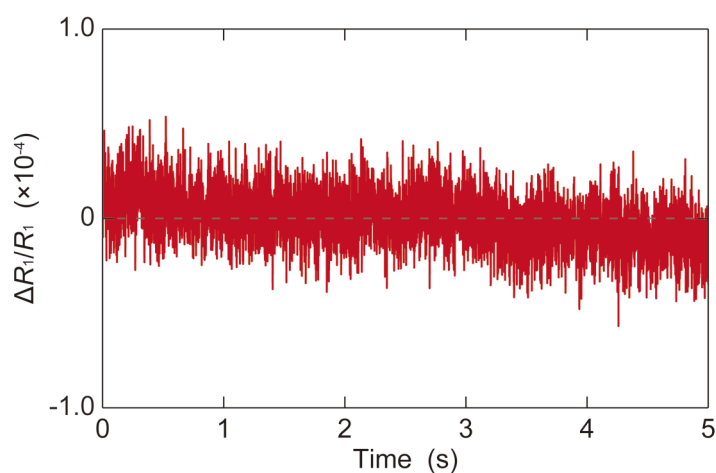


Figure 4.22 製作したセンサの無負荷時におけるノイズレベルの波形.

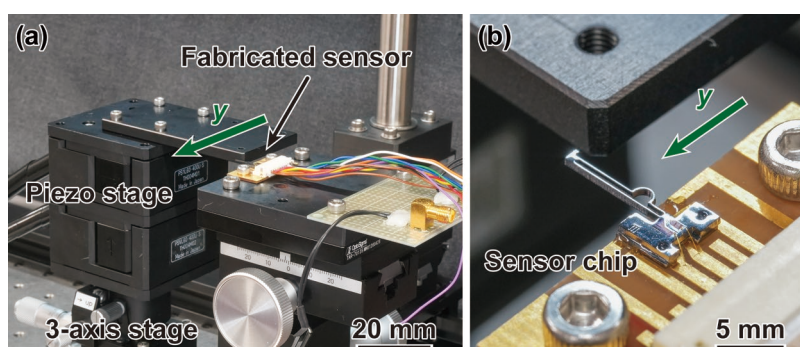


Figure 4.23 変位入力のための実験セットアップの写真. (a) セットアップ全体. (b) 変位印加部の拡大写真.

4.6 センサの応答特性評価

4.6.1 ノイズレベルの評価

最後に、製作したセンサの応答特性を評価した。以降の実験において、センサ応答として抵抗変化を計測する場合、前章と同様にブリッジアンプ回路を用いてカンチレバーの抵抗変化を電圧変化に変換し、オシロスコープで計測した。また、電圧信号の測定の際には、高周波ノイズを抑制するため、オシロスコープで 400 Hz のローパスフィルタ機能を利用した。Figure 4.22

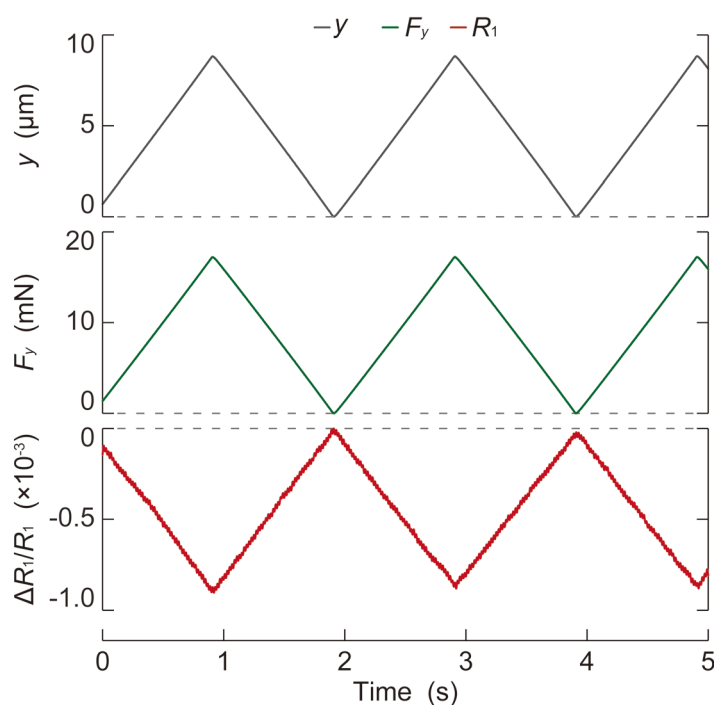


Figure 4.24 ピエゾステージによる y 軸正方向の入力変位と換算した力 F_y に対する、センサの応答波形。

に、外力を加えない状態で 5 s 間測定したカンチレバーの出力信号から得られたノイズレベルの波形を示す。この時のノイズ成分に起因する抵抗変化率の実効値 $\Delta R_{1,\text{RMS}}/R_1$ は 1.49×10^{-5} であった。この値は、3 章で製作したセンサのピエゾ抵抗層と同程度の値である。

4.6.2 入力した変位，力に対する応答評価

次に、センサの応答特性を評価した。Figure 4.23(a)に変位の印加に使用した、実験セットアップの写真を示す。センサはステージ上に固定され、反対側には金属片を取り付けたピエゾステージを配置した。この時、金属片は幅 4 mm、厚さ 40 mm、長さ 44 mm のアルミ製であり、カンチレバーと比較して十分高い 5.2 kN/mm というばね定数を有していることから、ピエゾステージの変位量を金属片先端の変位量と等しいものとみなした。Figure 4.23(b)に固定されたセンサの拡大図を示す。金属片とセンサの位置を調整し、金属片がカンチレバー先端に接触するように配置した後、ピエゾステージを駆動して y 軸方向に変位を与え、その時のセンサ応答を測定した。本研究においては、図に示すように、正方向からの入力に対する応答を計測した後、反対方向に金属片を移動させ、負方向からの入力に対する応答も計測した。

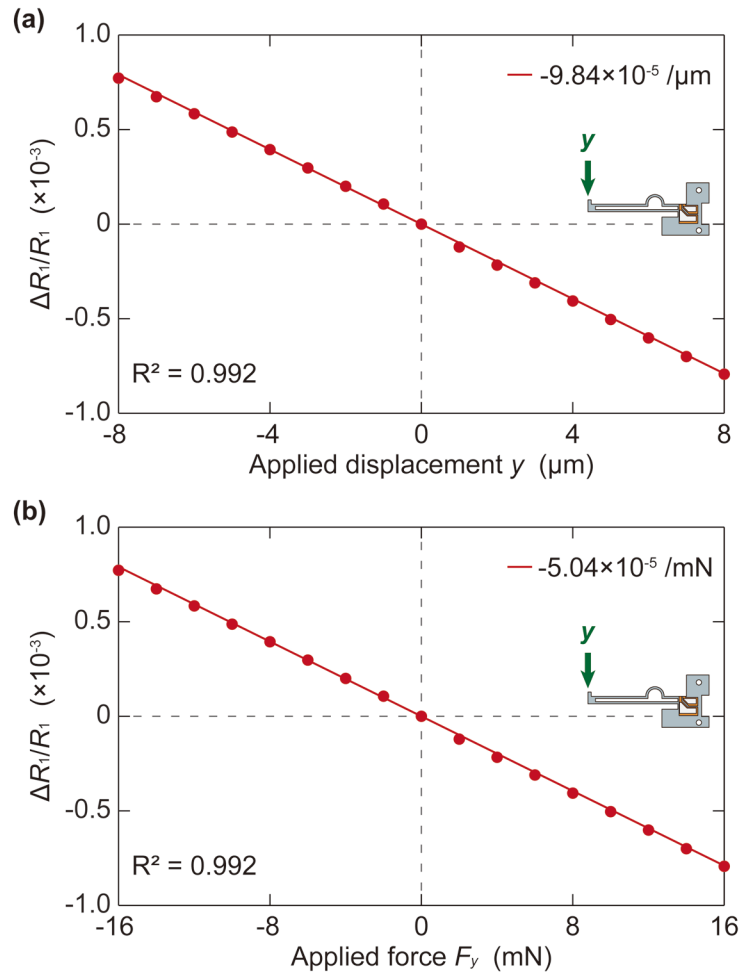


Figure 4.25 (a) 入力変位に対するセンサの抵抗変化率. (b) 換算された力に対するセンサの抵抗変化率.

Figure 4.24 に、 y 軸正方向の入力変位および力の波形に対する、センサの出力波形を示す。灰色の線はピエゾステージで与えた変位、緑色の線はセンサのばね定数を用いて変位から換算した力、赤色の線はそれらに対応するセンサの抵抗変化率を示す。センサ出力信号はカットオフ周波数 200 Hz のローパスフィルタを用いて処理した。変位振幅が約 $10 \mu\text{m}$ 、周波数 0.5 Hz の三角波を入力したところ、発生した力の振幅は約 20 mN となった。

Figure 4.25(a)に、印加変位とセンサの抵抗変化率との関係を示す。入力変位を $-8 \mu\text{m}$ から $8 \mu\text{m}$ に変化させた際に生じた抵抗変化率を、 $1 \mu\text{m}$ 刻みで平均してプロットした。センサ先端に y 軸正方向の変位を与えた際には抵抗が減少したため、形成したピエゾ抵抗層は引張りずみによって抵抗が減少するということが確認できる。変位と抵抗変化率の関係は線形であり、その

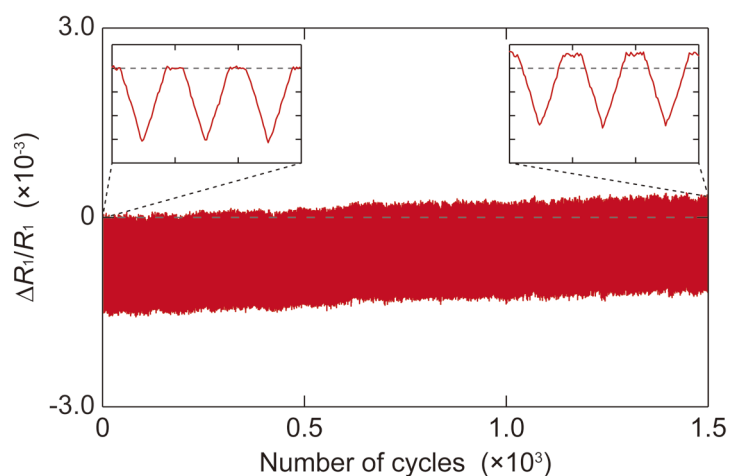


Figure 4.26 繰り返しの力入力に対するセンサの応答波形.

傾きである単位変位当たりの抵抗変化率は $-9.84 \times 10^{-5} / \mu\text{m}$ であった．よって，ノイズレベルを単位変位当たりの抵抗変化率で除すことで得られる変位分解能は 150 nm であった．また，単位変位当たりの抵抗変化率をシミュレーションから得られた単位変位当たりの表面平均ひずみから概算したゲージ率は， -13.3 となった． (110) 面上で， $\langle 110 \rangle$ 方向の n 型シリコンにおける典型的なゲージ率 -31.6 と比較すると，本センサは約 42% 程度の性能を示している [68]．

Figure 4.25(b)は変換された力とセンサの抵抗変化率の関係を示す．入力変位がばね定数を計測した際に印加した $30 \mu\text{m}$ よりも小さい範囲内であったため，力はセンサのばね定数を用いて入力変位から変換された．製作したセンサは印加した力に対して線形な応答を示し，その感度は $-5.04 \times 10^{-5} / \text{mN}$ であった．よって，ノイズレベルから推定されるセンサの力分解能は 0.30 mN であった．

4.6.3 繰り返し負荷に対する応答評価

最後に，センサに対する繰り返しの力入力に対する応答の評価を行った．センサのばね定数評価に用いた実験セットアップを用い，振幅約 30 mN の力を 0.5 Hz で 1500 サイクル，すなわち約 50 min 印加し続け，出力のドリフトを評価した．なお，本評価には，同一の製作プロセスにより製作されたが，これまでの評価に用いたものとは異なるセンサを用いた．結果を，Figure 4.26 に示す． 1500 サイクルの力を印加後，センサ応答にはわずかなドリフトが確認された．抵抗変化率のドリフト量は 4.55×10^{-4} であった．この時，実験中に入力された力は 0.3 mN 増加し

第4章 液浸側面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー

ており，これに基づいて概算される抵抗変化率の変化量は -1.5×10^{-5} である．この値はドリフト量と比較して小さく符号も逆であることから，ドリフトが実験セットアップに起因するものではないことが確認された．一方で，このドリフト量をピエゾ抵抗層のTCRを用いて温度変化に換算すると，約 0.14°C の温度低下に相当する．この結果より，観測されたドリフトは温度変化に起因するものとして妥当であると考えられる．以上の結果から，本章で提案したピエゾ抵抗型カンチレバーは，繰り返しの力負荷に対して安定して応答を示し，ピエゾ抵抗型の力センサとして十分有用であることが示された．

4.7 本章の総括

4.7.1 本章の結論

本章では，レーザドーピングを用いた多軸力センサ製作の第二段階として，液浸レーザドーピングを利用したデバイス側面へのピエゾ抵抗形成手法を提案し，それを用いて製作したピエゾ抵抗型カンチレバーの基礎特性について評価した．提案プロセスは，レーザ切断およびウェットエッチングによるセンサ構造の形成と，液浸レーザドーピングによる側面ピエゾ抵抗層のパターニングの2工程から構成される．レーザドーピングの特性を利用することで，デバイス側面のひずみ集中部に対してのみピエゾ抵抗層を選択的に形成した．さらに，センサ構造体を傾斜させた状態での液浸ドーピングにより，側面ピエゾ抵抗のひずみ検知領域から伸びた接続領域を，ひずみの影響を受けにくい土台構造の側面を経由して表面へと配線する構造が実現された．製作したセンサ構造は設計寸法と一致し，レーザ切断で生じた側面の粗さもウェットエッチングによって半分以下に低減されたことが確認された．この時，形成された支持梁の幅は $175\text{ }\mu\text{m}$ で，厚みは $580\text{ }\mu\text{m}$ であった．また，形成されたピエゾ抵抗層のドーパ濃度と深度の関係も評価した．フルエンスの低い側面ピエゾ抵抗では，表面濃度が 10^{19} cm^{-3} 程度で $1\text{ }\mu\text{m}$ 程度でバックグラウンドレベルに，フルエンスの高い表面ピエゾ抵抗では，表面濃度が 10^{20} cm^{-3} 程度で深さ最大で $4\text{ }\mu\text{m}$ 程度でバックグラウンドレベルに達した．一方で，TEMによるピエゾ抵抗層の結晶性評価の結果，ピエゾ抵抗層の多くの部分は基板と同様の結晶方位を維持しているものの，部分的に転位が生じることが確認された．また，表面ピエゾ抵抗層ではクラックが，側面ピエゾ抵抗層には局所的なアモルファス化が確認された．形成された側面ピエゾ抵抗層は，I-V特性，抵抗率，温度特性，などの電気的特性が評価され，基本的には単結晶のn型Siに近い特性が，温度特性にはアモルファスSiに起因すると考えられる負のTCRが確認された．さ

第4章 液浸側面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー

らに、変位および力に対してセンサは線形な応答を示し、ノイズレベルから算出した変位分解能は約 150 nm、力分解能は 0.30 mN であった。また、シミュレーションおよび実験結果から概算したゲージ率は-13 程度であった。

本章の目的は、液浸レーザドーピングを用いた側面ピエゾ抵抗層形成手法の確立であった。本章の結果より、目的とする形状の側面ピエゾ抵抗層が支持梁のひずみ検知部へ選択的に形成可能であることが確認された。また、側面ピエゾ抵抗層が形成された支持梁について、梁厚に対して梁幅を約 1/3 程度まで細く設計可能であることが確認された。さらに、レーザドーピングによって形成されたピエゾ抵抗層は、ゲージ率の絶対値が目標としていた 10 を上回っており、センサ素子として十分な感度を有していることが示された。以上より、液浸レーザドーピングを利用した側面ピエゾ抵抗パターンニング手法が確立されたと結論づけられる。この確立した手法を用いてデバイスの側面を含む複数面にピエゾ抵抗層を配置することで、独立して多軸力を検出できる MEMS 多軸力センサへと発展できる可能性が示唆された。

4.7.2 本章の考察

前節で示したように、液浸レーザドーピングを用いることで、デバイス側面にピエゾ抵抗層を選択的に形成し、ひずみ集中部に集約配置できる側面ピエゾ抵抗パターンニング手法が成立することが確認された。本節では、まずこの結果を既存の MEMS ピエゾ抵抗型力センサと比較し、本手法の優位性を考察する。

先行研究においては、側面ピエゾ抵抗を利用したカンチレバー型力センサが報告されている [88]。このセンサは従来の MEMS プロセスによって製作され、約 $5 \times 10^{-6} \mu\text{N}$ の力感度を示した。これは、本章で製作したセンサと比較して約 100 倍高い感度に相当する。ただし、この感度差は主にカンチレバーのばね定数の違いに起因する。本章で製作したセンサでは最小構造幅が約 200 μm であったため、先行研究で報告されているセンサのばね定数 $1.45 \times 10^{-2} \text{ N/mm}$ と比較して、約 130 倍のばね定数を有している。一方で、先行研究のセンサの有効ゲージ率の絶対値は約 10 程度であった。これは、製作プロセスの過程で支持梁表面にもピエゾ抵抗層が形成され、面内力印加時にひずみがほとんど生じない表面ピエゾ抵抗が、側面ピエゾ抵抗と電気的に並列接続された結果、全体としての抵抗変化率が低下したためであると考えられる。これに対し、本章で提案した側面ピエゾ抵抗パターンニング手法では、ひずみ集中部の側面のみにピエゾ抵抗層を選択的に形成できるため、面内力検出に寄与しない抵抗成分を排除することが可能である。その結果、製作したセンサは約 13 の有効ゲージ率を示しており、側面ピエゾ抵抗の選択的パターンニングが、力検出性能の向上に有効であることが示された。

第4章 液浸側面レーザドーピングを利用したピエゾ抵抗型カンチレバー

一方で、第3章で形成した表面ピエゾ抵抗層と比較すると、側面ピエゾ抵抗層ではゲージ率が低下する傾向が確認されており、これはレーザ切断後の側面粗さの影響によるものと考えられる。ただし、このような影響はプロセス条件に依存するものであり、ウェットエッチング条件の調整やレーザ照射条件の最適化によって低減可能であると考えられる。また、液浸レーザドーピングでは、側面と表面に連続したピエゾ抵抗層を形成できるという利点を有する一方で、気泡の発生や局所的なアモルファス化が生じる場合がある。これに対する代替案としては、ガスを用いたレーザドーピングや [95]、化学成膜法などによってあらかじめドーパント源を成膜した上でのレーザドーピングも考えられる [96]。しかしながら、これらの手法ではプロセス装置や工程が複雑化する点に加え、側面から表面へと連続したピエゾ抵抗層を形成する場合には、エッジ部における被膜性といった新たな課題が生じる可能性がある。

センサ構造の観点では、本章では比較的厚い Si 基板を用いて試作を行ったため、波状パターンによる切断の影響で、支持梁側面は垂直方向から約 5° の傾斜を有する結果となった。この傾斜は、側面ピエゾ抵抗が面外方向の力に対しても応答する要因となり得るが、切断条件の調整によって十分改善可能であると考えられる。

以上を踏まえ、次章では、本章で確立した側面ピエゾ抵抗パターンニング手法を用い、側面および表面の複数面にピエゾ抵抗層を配置した多軸力センサ製作と多軸力検出の実証を行う。

第5章 液浸レーザドーピングを利用した MEMS ピエゾ抵抗型三軸力センサ

5.1 本章の概要

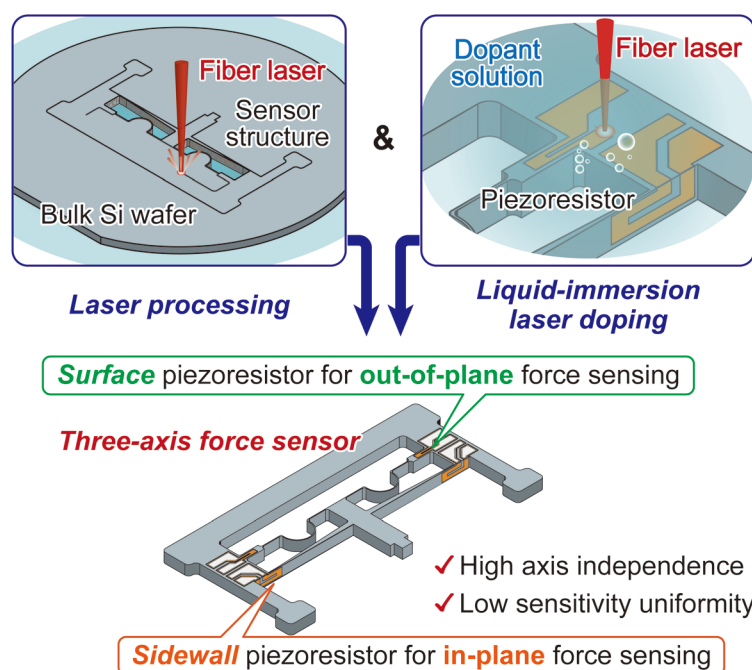


Figure 5.1 液浸レーザドーピングを利用した MEMS ピエゾ抵抗型三軸力センサの概要.

本章では、レーザドーピングを用いた多軸力センサ製作の最終段階として、デバイス表面およびデバイス側面の両方にpiezo抵抗を形成した MEMS ピエゾ抵抗型三軸力センサを製作し、その性能について評価する。本章の目的は、第4章で確立した液浸レーザドーピングによるピ

第5章 液浸レーザドーピングを利用した MEMS ピエゾ抵抗型三軸力センサ

エゾ抵抗パターンニング手法を利用して、各軸方向で近い力感度と高い応答独立性を両立する MEMS ピエゾ抵抗型三軸力センサの製作手法を確立することである。具体的には、以下の観点から提案手法の有効性を評価する。第一にセンサ応答の独立性を評価する指標としてコサイン類似度を用い、三軸方向の入力に対する感度ベクトル間のコサイン類似度が 0.2 以下となることを目標とする。第二に、形成されたピエゾ抵抗層のゲージ率の絶対値が 10 を超えることを目標とする。第三に、各軸方向の力に対して極端な感度偏りが生じないために、同一オーダの力感度が得られることを目標とする。第四に前述の目標達成に有利な構造条件として、表面ピエゾ抵抗層および側面ピエゾ抵抗層が形成された支持梁において、対応する力入力に対して相対的に低剛性となるよう、梁厚に対して梁幅が 1/5 以下となる高アスペクト比の構造を実現することを目標とする。

次節以降では、まず、提案するセンサの概要および、製作する三軸力センサの設計について述べる。次に、提案するセンサの製作手法ならびに得られたデバイス形状の評価について述べる。その後、ピエゾ抵抗層の電気的特性およびセンサの応答特性について評価する。最後に、製作した三軸力センサの性能を既存のピエゾ抵抗型 MEMS 多軸力センサと比較し、本手法の有用性について考察する。

5.2 センサ概要および設計

5.2.1 提案するセンサの概要

Figure 5.1 に、提案する MEMS ピエゾ抵抗型三軸力センサの概要を示す。提案するセンサは、デバイス側面と表面にピエゾ抵抗を有し、それぞれが面内方向と面外方向の力を検出する構成となっている。また、各ピエゾ抵抗層が形成されている支持梁構造は、対応する力方向に対して優先的に変形するように設計されており、該当するピエゾ抵抗には計測対象となる方向の力によって相対的に大きなひずみが生じる。このように、異なる方向に配置されたセンサ素子と、力方向ごとに変形特性を制御した支持梁構造を組み合わせることで、三軸方向の力を高い独立性をもって計測することが可能となる。さらに、各支持梁が面外方向または面内方向のいずれか一方の力に対してのみ変形しやすい構造であるため、対応しない力入力による変形が抑制され、軸間の力感度のばらつきも低減される。

センサチップの製作手法は、前章までに確立したプロセスを組み合わせることで実現しており、レーザ加工による 2.5 次元的なセンサ構造体の形成と、液浸レーザドーピングによるデバ

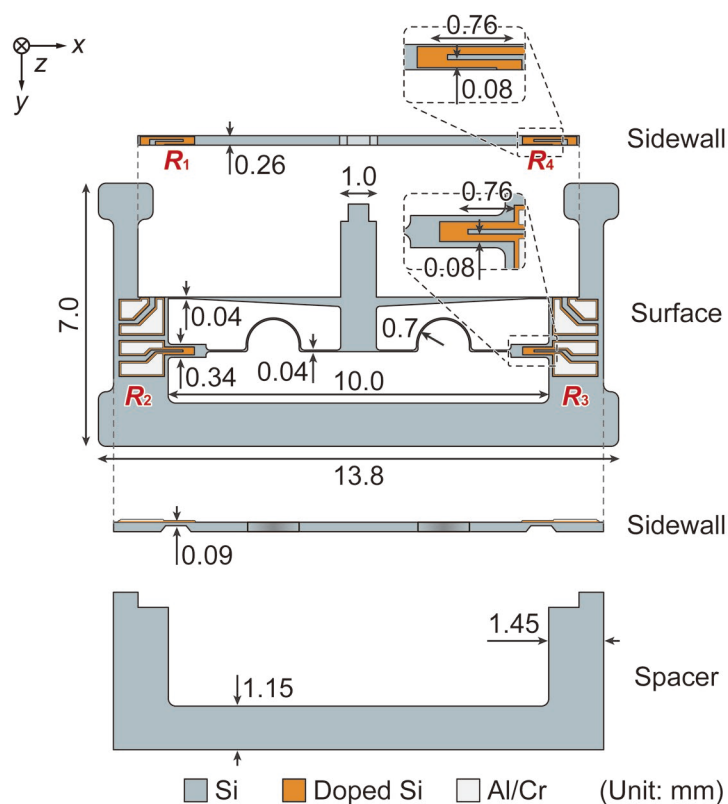


Figure 5.2 製作した三軸力センサチップとスペーサーの設計.

イス側面および表面へのピエゾ抵抗層形成の二段階から構成される．この際、側面へのドーピングはセンサ構造体を傾斜させた状態でいき、表面へのドーピングはセンサ構造体を水平に配置した状態で行う．これにより、傾斜照射に起因して大面積の表面ピエゾ抵抗層を均一に形成できないという、第4章で指摘した課題を解消している．

5.2.2 設計

Figure 5.2 に、提案するセンサチップの設計を示す．本章においては、提案する液浸レーザドープングが多軸センサ製作に適用可能であるか検証することを目的としている．そのため、安定して製作が可能な範囲でセンサ構造の微細化しを行い、感度向上を図った．提案するセンサチップは、中心に配置されたプローブと、それを支持する 4 本の支持梁、およびそれらが接続される土台構造から構成される．1.2.1 節で定義した通り、図中- z 方向の面をセンサチップ表面、図中 xy 方向の面をセンサチップの側面と定義する．また、 z 軸方向を面外方向、 x 軸および y 軸方向を面内方向と定義する．4 本の支持梁のうち、 y 軸負方向側の 2 本の支持梁には、側面にピ

 第 5 章 液浸レーザドーピングを利用した MEMS ピエゾ抵抗型三軸力センサ

エゾ抵抗層が形成されており，これらが面内力である x 軸および y 軸方向の力を検出する．これら 2 本の支持梁を側面支持梁と定義する．側面支持梁は，ピエゾ抵抗層が形成された領域の幅が狭く，プローブ側に向かって徐々に幅が広がる構造を有している．この構造により，面内力が印加された際に，側面支持梁の両端の内，土台構造に接続されている側が変形しやすくなり，ひずみが側面ピエゾ抵抗層のひずみ検知領域に集中する．一方，残りの 2 本の支持梁には曲線部が設けられており，その根元にはカンチレバー構造が形成されている．このカンチレバー構造の表面にピエゾ抵抗層が形成されており，面外力に相当する z 軸方向の力を検出する．これら 2 本の支持梁を表面支持梁と定義する．カンチレバーの根元にはノッチ構造が形成されており，面外力が加わった際に変形しやすく，ひずみが表面ピエゾ抵抗層のひずみ検知領域に集中するよう設計されている．また，面内方向の力が印加された場合は，曲線部が優先的に変形することで，カンチレバーの面内方向への変形が抑制される．この時，側面ピエゾ抵抗を紙面左側から順に R_1 , R_4 と，表面ピエゾ抵抗を同様に左側から R_2 , R_3 と定義する．

センサチップの各部の寸法は，図中に示した通りである．センサチップの外形は $13.8 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$ で厚さは $260 \text{ }\mu\text{m}$ ，支持梁の全長は 10 mm である．そして，側面支持梁の最も幅が狭い部分と，表面支持梁の幅は $40 \text{ }\mu\text{m}$ で，曲線部中心の曲率半径は 0.7 mm である．表面支持梁に含まれるカンチレバー構造は，幅が 0.34 mm で長さが 1 mm ，ノッチ構造部の長さは 0.8 mm で厚みは $90 \text{ }\mu\text{m}$ である．これらの設計寸法は，レーザ切断時の線幅およびその後のウェットエッチングによる寸法の縮小を考慮した製造後の推定値である．また，前章と同様に，センサチップを基板へ固定する際には，センサチップの土台構造と同一寸法で厚さ $300 \text{ }\mu\text{m}$ のスペーサーを使用する．

ピエゾ抵抗層は，側面支持梁とカンチレバー根元のひずみ集中部に U 字形状に形成されている．どちらのピエゾ抵抗層もその両端は土台構造表面まで延長されており，その部分には電極用パッドが形成されている．これらのパッド上には Al/Cr 電極を蒸着し，基板と電氣的に接続できるようになっている．どちらのピエゾ抵抗層もひずみ検知部の寸法は，幅 $80 \text{ }\mu\text{m}$ ，長さ $760 \text{ }\mu\text{m}$ で，U 字部の間隔は $50 \text{ }\mu\text{m}$ である．側面ピエゾ抵抗の電極パッド領域の寸法は，大きい方が概ね $1.2 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$ ，小さい方が概ね $0.8 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$ である．また，表面ピエゾ抵抗の電極パッド領域の寸法は，どちらも概ね $1.2 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm}$ である．電極は，電極用パッド領域の外周から $50 \text{ }\mu\text{m}$ ずつ内側に収まるように設計されている．また，前章と同様にセンサチップ表面を Si ウエハの(100)面，プローブの長手方向を $\langle 110 \rangle$ 方向に一致するようにした．そのため，表面ピエゾ抵抗は(100)面上に $\langle 110 \rangle$ 方向と平行に，側面ピエゾ抵抗は(110)面上に $\langle 110 \rangle$ 方向と平行になるように形成される．

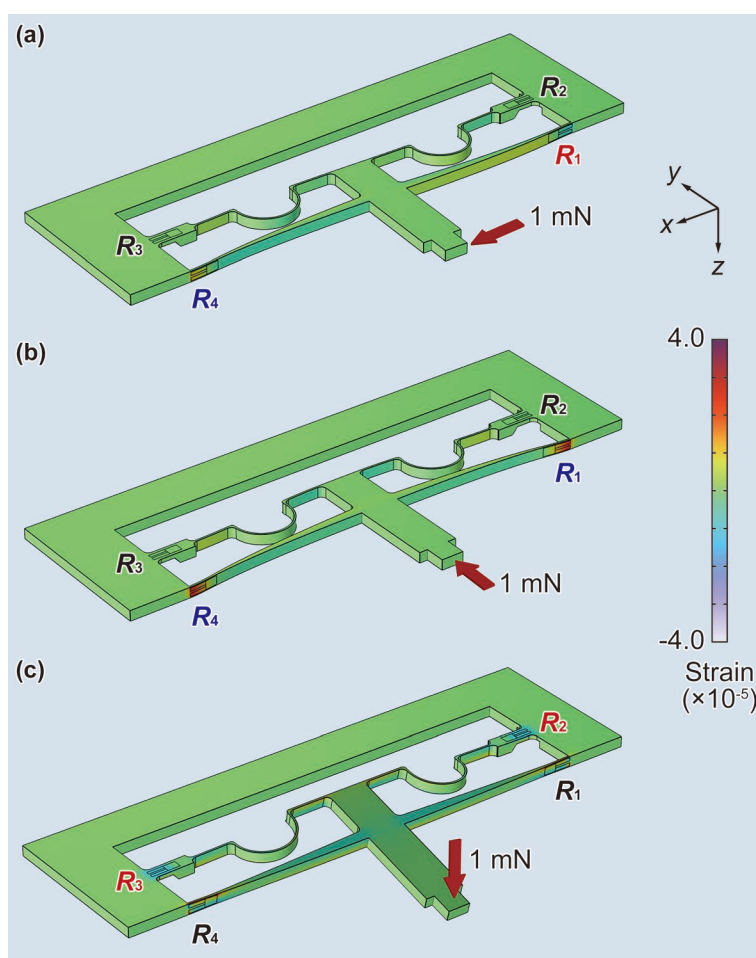


Figure 5.3 各軸方向の力に対するひずみ分布のシミュレーション. (a) x 軸方向の力. (b) y 軸方向の力. (c) z 軸方向の力.

5.2.3 シミュレーション

提案するセンサの機械的特性を評価するために、FEM シミュレーションによって、力に対するひずみ分布を評価した。解析にはこれまでと同様に、ヤング率およびポアソン比の方向依存性を考慮した単結晶 Si を使い、カンチレバー表面を(100)面に、プローブの長手方向を $\langle 110 \rangle$ 方向に一致させた。この時、Si の密度は 2330 kg/m^3 であった。FEM モデルでは、設計寸法に基づいてセンサ構造のみ作成し、配線層およびpiezo抵抗層は無視した。また、スペーサによって接続される、センサチップ土台構造の底面に固定拘束を与えた。プローブの先端に、 x , y , z 方向に 1 mN の力を印加した際のセンサチップのひずみ分布を、Figure 5.3 に示す。図中では、セ

 第 5 章 液浸レーザードーピングを利用した MEMS ピエゾ抵抗型三軸力センサ

Table 5.1 シミュレーションより算出した各軸方向のばね定数.

x-axis spring constant [N/mm]	y-axis spring constant [N/mm]	z-axis spring constant [N/mm]
3.90	2.04	0.222

Table 5.2 各軸力に対するピエゾ抵抗層表面の平均ひずみ.

	Strain from x-axis force [$10^{-6}/\text{mN}$]	Strain from y-axis force [$10^{-6}/\text{mN}$]	Strain from z-axis force [$10^{-6}/\text{mN}$]
R_1	-6.87	16.5	0.226
R_2	0.0250	0.0217	-10.6
R_3	-0.0250	0.0219	-10.6
R_4	6.87	16.5	0.207

ンサの変形を明確にするため xy 方向の力の場合は 500 倍, z 方向の力の場合には 150 倍に変形を誇張して表現されている. ひずみのカラーマップにおいて, 赤は引張ひずみ, 青は圧縮ひずみを示す. この時, プローブ先端の変位量から算出したばね定数を Table 5.1 示す. x, y 軸方向は 2 倍程度のばね定数を示している, プローブによって変位量が増加する z 軸方向のばね定数は, それらの 1/10 程度まで減少した.

x 軸方向正の力を印加すると, Figure 5.3(a)に示すようにプローブが面内方向に傾き, 側面支持梁の根元にひずみが集中する. この時, R_1 には負のひずみが, R_4 には正のひずみが生じる. 一方, 表面支持梁の根元にはひずみは集中しない. y 軸方向正の力を印加すると, Figure 5.3(b)に示すようにプローブが y 軸正方向に移動し, それに伴って側面支持梁の根元にひずみが集中する. この時, R_1 と R_4 に正のひずみが生じる. 一方, 表面支持梁の根元にはひずみは集中しない. z 方向正の力を印加すると, Figure 5.3(c)に示すように側面支持梁を中心としてプローブ先端が z 軸正方向に下がり, それに伴って表面支持梁が持ち上がり, 表面支持梁の根元にひずみが集中する. この時, R_2 と R_3 に負のひずみが生じる. 一方, 側面支持梁の上側には正のひずみが, 下側には負のひずみが発生し, 抵抗内ではそれらが打ち消しあうことによって, 表面平均ひずみが減少する. この時, 各抵抗は n 型のピエゾ抵抗であるため, 正のひずみによって抵抗値が減少し, 負のひずみによって抵抗値が増加する. シミュレーションより求めた, 各ピエゾ抵抗層表面に発生する表面平均ひずみを Table 5.2 に示す. 前述の通り, 計測対象となる力に反応するピエゾ抵抗表面に発生するひずみに対し, 反応しない表面に発生するひずみ量は小さく抑えられていることが確認でき, x 軸方向と y 軸方向では約 0.3%, z 軸方向では約 2%程度にとどまっている. 生じるひずみと各ピエゾ抵抗の抵抗変化率の関係が線形の場合, 各ピエゾ抵抗

の抵抗変化率と印加される三軸力の関係は次式で表される．

$$\begin{pmatrix} \Delta R_1/R_1 \\ \Delta R_2/R_2 \\ \Delta R_3/R_3 \\ \Delta R_4/R_4 \end{pmatrix} = \mathbf{C} \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

ここで， $\mathbf{C}$ は各抵抗の力に対する感度から決定される特性行列である．また，特性行列の逆行列 $\mathbf{C}^{-1}$ を用いることで，測定された抵抗変化率から三軸力を一意に求めることができる．ここで，すべてのpiezo抵抗の感度が等しく，各軸力に反応しないpiezo抵抗に発生するひずみを0とした場合，特性行列 $\mathbf{C}$ は以下のように表される．

$$\begin{pmatrix} \Delta R_1/R_1 \\ \Delta R_2/R_2 \\ \Delta R_3/R_3 \\ \Delta R_4/R_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_x & -c_y & 0 \\ 0 & 0 & c_z \\ 0 & 0 & c_z \\ -c_x & -c_y & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

このように，三軸力に対する抵抗変化の応答は互いに直交するため，各軸成分を独立に計測できる．したがって，提案するセンサ構造とpiezo抵抗の配置は，高い独立性を持つ三軸力計測に有効であることがシミュレーションより確認された．

5.3 製作

5.3.1 レーザ照射条件

本章でセンサの製作に用いたレーザ照射条件について説明する．レーザ照射の工程は，主に6工程あり，バックサイドエッチング，ウエハの切断，裏面と表面へのアライメントマークの形成，側面と表面への液浸ドーピングである．この時，Si ウエハへの加工は3.3.2節で説明したウエハホルダを用い，液浸ドーピングには後述する特注チャンバを用いた．Table 5.3 に各プロセスのレーザ照射条件を示す．バックサイドエッチングのレーザ走査方法は3.3.2節で説明した方法と同様に，ラスタスキャン方式で行い，カンチレバー構造の長手方向を 0° とした場合， 45° と -45° の各方向に3回ずつ往復するようにレーザを照射した．この時の走査間隔は $5\mu\text{m}$ で，アライメント誤差を考慮し，ノッチ領域の設計値よりも幅が広い $0.8\text{mm}\times 0.8\text{mm}$ の範囲にレーザを照射した．ウエハ切断時およびアライメントマーク形成時のレーザ走査方法はベクタスキャン方式で行った．この時，裏面アライメントマークはウエハを貫通するように，表面アライメントマークはウエハ表面に傷を付けるようにレーザを照射した．液浸ドーピングについては，4.3.1節で説明したようにラスタスキャン方式で行い，概ね同様の手法でレーザを走査した．側面ド

 第 5 章 液浸レーザードーピングを利用した MEMS ピエゾ抵抗型三軸力センサ

Table 5.3 各プロセスにおけるレーザー照射条件.

Process	Average power [W]	Frequency [Hz]	Scan speed [mm/s]	Scan number [-]	Defocus [mm]
Backside etching	19.5	25k	500	6	-0.15 – 0.03
Cutting	30	20k	60	60	-0.15 – 0.15
Alignment mark (backside)	30	20k	60	60	-0.15 – 0.15
Alignment mark (topside)	9	20k	20	1	-0.15
Doping (sidewall)	13.5	10k	60	1	-1.23 – -1.08
Doping (surface)	3.6	10k	60	1	0.52

Table 5.4 各工程におけるスポット半径, 平均出力密度, フルエンスおよび透過率.

Process	Spot radius [μm]	Average power density [MW/cm^2]	Fluence [J/cm^2]	$T_{\text{liq, total}}$ [%]
Backside etching	13.5 – 14.5	5.88 – 6.76	294 – 338	-
Cutting	13.5 – 14.5	9.05 – 10.4	452 – 520	-
Alignment mark (backside)	13.5 – 14.5	9.05 – 10.4	452 – 520	-
Alignment mark (topside)	14.5	2.72 – 3.12	136 – 156	-
Doping (sidewall)	38.9×44.9 – 44.0×50.8	0.358 – 0.457	35.8 – 45.7	92.9 – 93.2
Doping (surface)	20.5	0.508	50.8	93.1

ーピングにおいてはウエハを 60° 傾けてドーパント溶液に完全に浸漬し, 表面ドーピングにおいてはウエハを水平にしてドーパント溶液に完全に浸漬し, ピエゾ抵抗層根元から先端の向きにレーザーを等間隔で照射した. 側面ドーピングにおいては液面とデバイス側面の中心との垂直距離が, 表面ドーピングにおいては液面とデバイス表面の垂直距離が, 約 1.5 mm になるように調整した. レーザの走査間隔は, 側面照射時は $4 \mu\text{m}$, 表面照射時は $5 \mu\text{m}$ とし, いずれもデバイス側面および表面に対して実効的に約 $5 \mu\text{m}$ の間隔でレーザーが照射されるよう設定した. 側

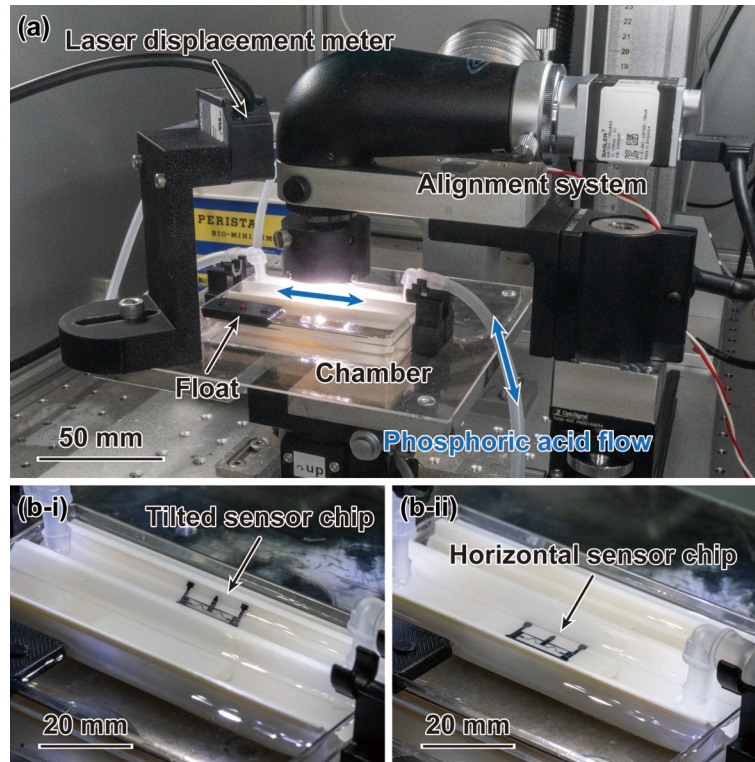


Figure 5.4 液浸レーザドーピングに使用したチャンバ. (a) チャンバ全体の写真. (b-i) 側面ドーピング用の治具の写真. (b-ii) 表面ドーピング用の治具の写真.

面ドーピングでは液面から 2.65 mm の位置に焦点が，表面ドーピング時では液面から 0.98 mm の位置に焦点が位置するようにチャンバ高さを調整した．Table 5.4 に各照射条件におけるスポット半径，平均出力密度，フルエンス，液中の透過率の概算値を示す．大気中での照射条件は式(3.11)から式(3.13)を，液中での照射条件は式(4.8)から式(4.12)を用いて算出した．また，側面へのレーザドーピング時は， $h_f = 2.65$ mm， $\theta = 30^\circ$ とし， h_s は 1.425 mm から 1.575 mm の範囲で変化した．同様に，表面へのレーザドーピング時は， $h_f = 0.98$ mm， $\theta = 0^\circ$ とし， $h_s = 1.5$ mm であった．本章で用いた側面ドーピングおよび表面ドーピングのフルエンスは，前章での側面ドーピングと同程度の値であることを確認した．そのため，piezo抵抗層の電気的特性も前章と同様の応答を示すことが予想される．

次に，本章の液浸ドーピングに使用したチャンバについて説明する．Figure 5.4(a)に使用したチャンバの写真を示す．基本的には 4.3.1 節で説明したチャンバと同様の仕組みになっており，センサ構造体を配置するための治具，ドーパント溶液を循環させるためのチューブとチューブポンプから構成されている．変更点としては，ドーパント溶液の循環方向が二方向になったこ

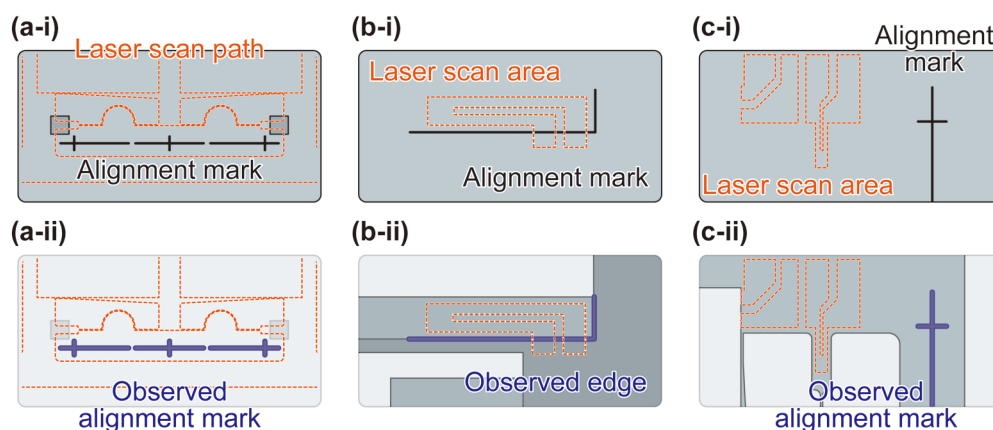


Figure 5.5 各工程におけるアライメント手順. (a) ノッチ構造のバックサイドアライメント. (b) 側面ピエゾ抵抗層のアライメント. (c) 表面ピエゾ抵抗層のアライメント. (i)にはアライメントマークを示し, (ii)には透過したアライメントマークとアライメント対象を示す.

とに対応し治具の設計を変更した点, 3D プリント製(Bambu Lab, X1 carbon)のフロートとレーザ変位計(CD22-100V2, OPTEX FA Co., Ltd.)を用いて液面高さを一定に保つシステムを新たに導入した点, およびアライメントシステムの光量不足解消のため超高輝度 LED を用いたリングライトを採用した点である. Figure 5.4(b-i)に側面ドーピングに利用する治具の拡大写真を示す. 前章と同様の傾斜角 60° の斜面に沿ってセンサ構造体が保持され, 液面からセンサチップへの距離も適切な位置に自動的に固定されるように設計されている. ドーパント溶液の循環の方向は, 右側のピエゾ抵抗つまり R_4 を形成する際は右方向, 左側のピエゾ抵抗つまり R_1 を形成する際は左方向であった. Figure 5.4(b-ii)に表面ドーピングに利用する治具の拡大写真を示す. 治具表面にはセンサ構造体と同じ寸法のくぼみが形成されており, そのくぼみにセンサ構造体をはめることによって, センサ構造体が保持され, 液面からの距離も適切な位置に自動的に固定されるように設計されている. ドーパント溶液の循環方向は, 側面ピエゾ抵抗層形成時と同様で, 右側のピエゾ抵抗つまり R_3 を形成する際は右方向, 左側のピエゾ抵抗つまり R_2 を形成する際は左方向とした.

各工程のアライメント手順を Figure 5.5 に示す. 本センサ製作においては, センサ裏面のノッチ構造とセンサ構造体, センサ構造体側面と側面ピエゾ抵抗層, センサ構造体表面と表面ピエゾ抵抗の計 3 種類のアライメントを行った. Figure 5.5(a)に, ノッチ構造のバックサイドアライメント手順を示す. まず, ノッチ構造の下, センサ構造の無い部分に横長の表面まで貫通しているアライメントマークを形成する. このマークを撮像した後, ウエハを裏返し, ウエハ表面に到達しているマークとアライメントする. Figure 5.5(b)に, 側面ピエゾ抵抗層のアライメント

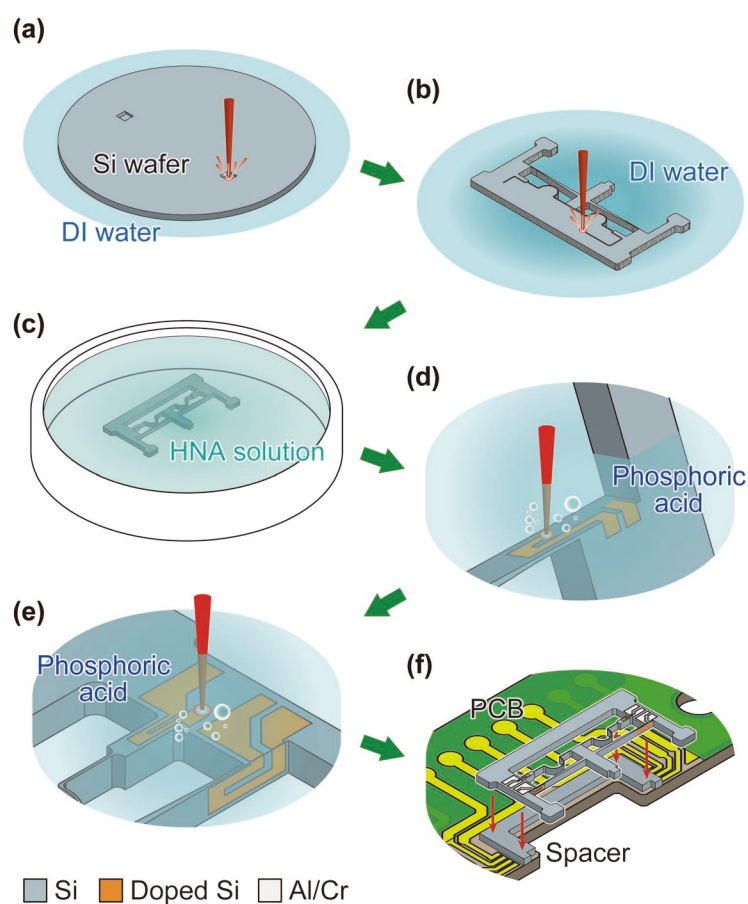


Figure 5.6 提案するセンサの製作プロセス. (a) バックサイドエッチングによるノッチ構造の形成. (b) Si ウエハからセンサ構造体の切り出し. (c) HNA エッチングによるデブリ除去と側面粗さの低減. (d) 液浸側面レーザドーピングによる側面ピエゾ抵抗層の形成. (e) 液浸表面レーザドーピングによる表面ピエゾ抵抗層の形成. (f) PCB への接続.

手順を示す. 前章と同様に, 側面ピエゾ抵抗層のエッジを撮像し, センサ構造体のエッジに合わせる. この時, 側面ピエゾ抵抗の電極パッド領域にはレーザを照射せず, 表面へ $25\ \mu\text{m}$ のみ接続領域を延長して照射した. Figure 5.5(c)に, 表面ピエゾ抵抗層のアライメント手順を示す. ダミーウエハに形成したアライメントマークを撮像し, センサ構造体表面にあらかじめ形成された表面アライメントマークと位置を合わせた. この時, 表面ピエゾ抵抗層全体に加え, 側面ピエゾ抵抗の左右の電極用パッド領域も同時に形成した. 側面と表面ピエゾ抵抗はセンサチップの左右にあり, 角度によるアライメントエラーを低減するため, 左右を別々にアライメントしてレーザ照射を行った.

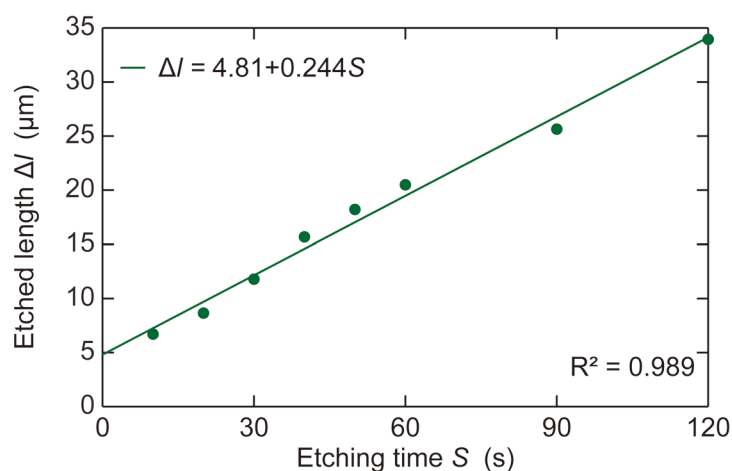


Figure 5.7 使用した Si エッチャントのエッチレート.

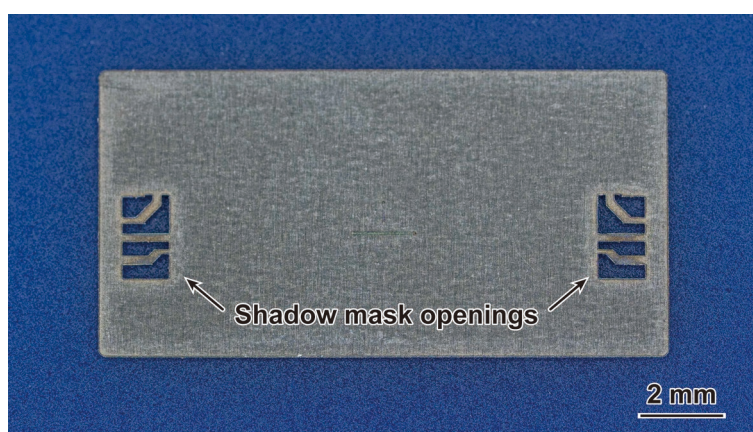


Figure 5.8 蒸着に使用したシャドウマスク.

5.3.2 製作プロセス

Figure 5.6 に、提案するセンサの製作プロセスを示す。センサの材料には、3 章で用いた、厚さ 300 μm の Si ウエハを用いた。まず Table 5.3 に示したレーザ照射条件を用い、バックサイドアライメント用のアライメントマークとノッチ構造をウエハの裏面に形成した(Figure 5.6(a))。この時、レーザ照射によるノッチ構造の破損を防ぐため、ウエハとウエハホルダーの間を純水で満たした。次にウエハを裏返し、前述の方法で表面と裏面のアライメントを行った。その後、前述のレーザ照射条件によってウエハから表面アライメントマークが形成されたセンサ構造体を切り出した(Figure 5.6(b))。この工程においても、ウエハとウエハホルダーの間は純水で満たし

 第 5 章 液浸レーザドーピングを利用した MEMS ピエゾ抵抗型三軸力センサ

た. 次に, HNA 溶液を用いて, デバイス側面のデブリ除去および表面粗さの低減を行った(Figure 5.6(c)). 本章では, この工程の再現性を高めるため, 市販の HNA 溶液系の Si の等方性エッチャント(SE2020, Hayashi Pure Chemical Ind., Ltd.)を用いた. エッチングは, センサ構造体を水平に保持した状態で, 静止している溶液に 1 min 間浸すことで行った. 前章では回転溶液中でエッチングを行ったが, センサ構造体表面へのダメージを低減するため, 静止している溶液を用いた. 予備検討として行った, このエッチャントを用いた際の Si のエッチレートを Figure 5.7 に示す. センサ構造体と同じウエハを用いて, 0.52 mm×0.52 mm の正方形の穴を開けた 5 mm 角のチップを複数製作した. これらのチップを 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, 120 s エッチングし, エッチング時間における穴の拡大量を計測することで, エッチングレートを概算した. エッチング時間を S , エッチングレートを Δl とした場合, その関係は以下の通りであった.

$$\Delta l = 4.81 + 0.244S \quad (5.3)$$

エッチング時間が 0 s の時, デブリを 48%の HF 洗浄後, 超音波洗浄によって可能な限り取り除いたが, 残存したデブリによって穴寸法が正確に計測できないことを考慮し, 切片を含む線形モデルで近似した. 式(5.3)より 1 min あたりのエッチング量は約 20 μm であった. したがって, 1 min のエッチングにより, センサ構造体の厚さおよび幅を含む全体寸法は等方的に約 39 μm 縮小した. また, エッチングによる側面粗さの低減効果を評価した. エッチング前の算術平均粗さは $R_a = 2.6 \mu\text{m}$, 最大高さ粗さ $R_z = 9.3 \mu\text{m}$ であった. 一方, 1 min のエッチング後には, $R_a = 1.0 \mu\text{m}$, $R_z = 5.1 \mu\text{m}$ まで低減することが確認された. 前章で使用した Si エッチャントと比較するとエッチレートが低いため, 側面粗さの低減量は相対的に小さい結果となった. 続いて, 前述の条件とチャンバを用いて液浸レーザドーピングを実施し, 側面piezo抵抗を形成した(Figure 5.6(d)). ドーパント溶液には前章と同様に 85%の H_3PO_4 水溶液を用い, 15 mL/min の速度でチャンバ内を循環させた. その後, 液浸レーザドーピングによって, 右側と左側の表面piezo抵抗を形成した(Figure 5.6(e)). その後, 残存する H_3PO_4 水溶液を除去するため, 48% HF でpiezo抵抗層が形成されたセンサ構造体を洗浄した. 洗浄後シャドウマスクを介して Cr/Al 層を蒸着し, 電極を形成した(Figure 5.6(e)). Figure 5.8 に蒸着に利用したシャドウマスクを示す. 前章で用いたアクリルの土台を用いる手法では, 蒸着時の熱によってセンサ構造体と土台が膨張した際の膨張率の違いによって, 微細なセンサ構造が破断してしまう. そのため, センサ構造体外形とシャドウマスク外形を合わせることでアライメントを行った. 電極は, まず約 30 nm の Cr を密着層として, 続いて約 200 nm の Al を導電層として蒸着した. 最後に, 厚さ 300 μm の Si 製のスペーサを介してエポキシ接着剤によってセンサチップを基板に接着し(Figure 5.6(f)),

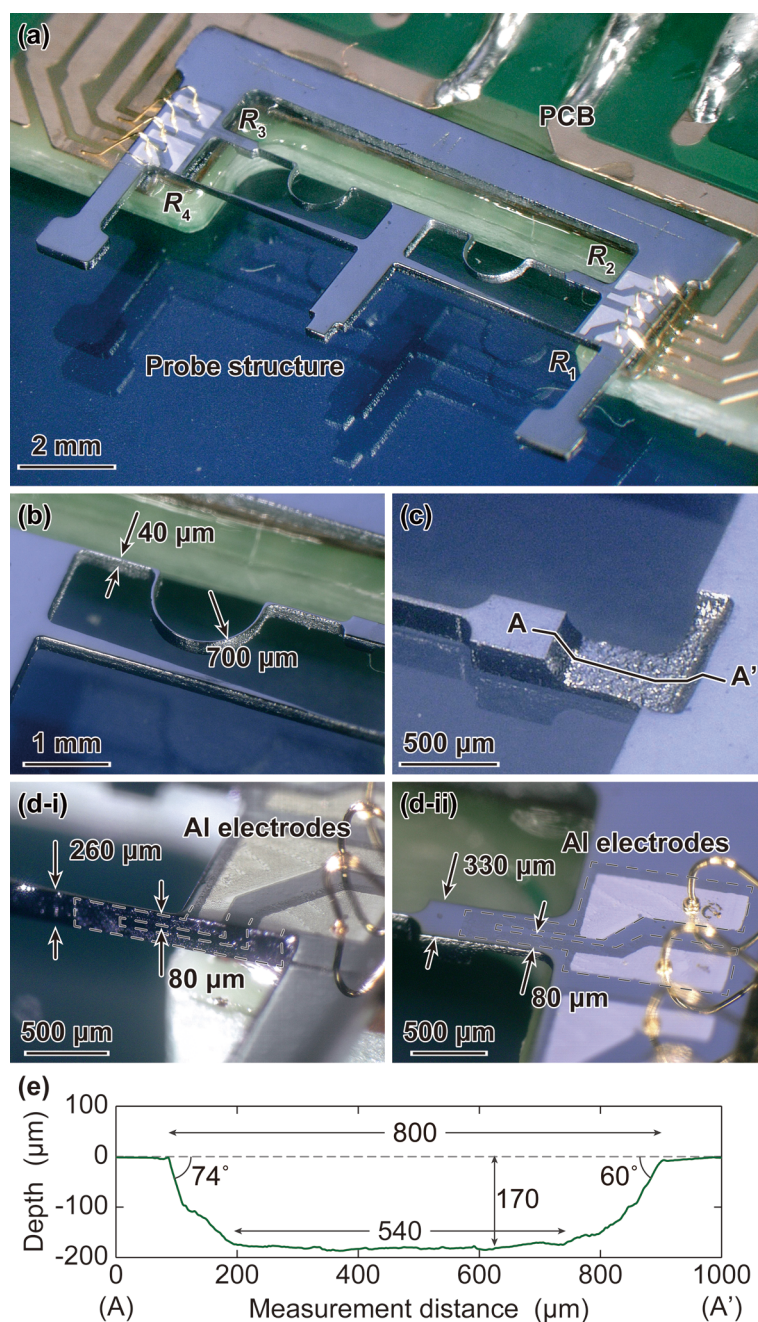


Figure 5.9 製作したセンサの顕微鏡写真. (a) 基板上に実装されたセンサ. (b) 表面支持梁の曲線構造. (c) カンチレバー構造裏面. (d-i) 側面ピエゾ抵抗層. (d-ii) 表面ピエゾ抵抗層. (e) カンチレバー構造裏面のプロファイル.

ワイヤボンディングによって電気的な接続を行った.

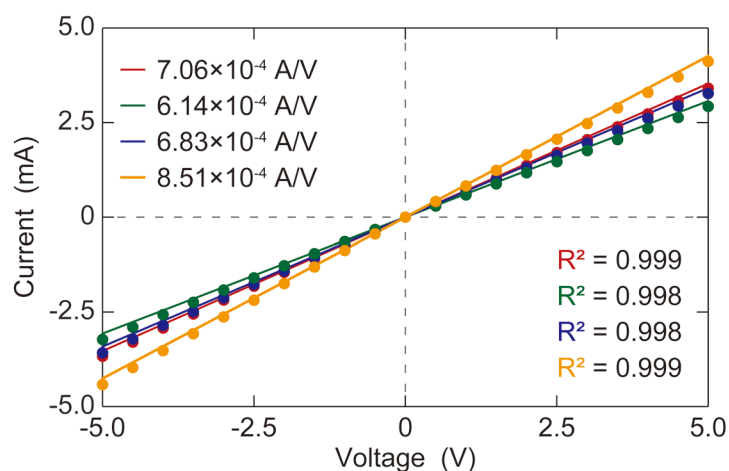


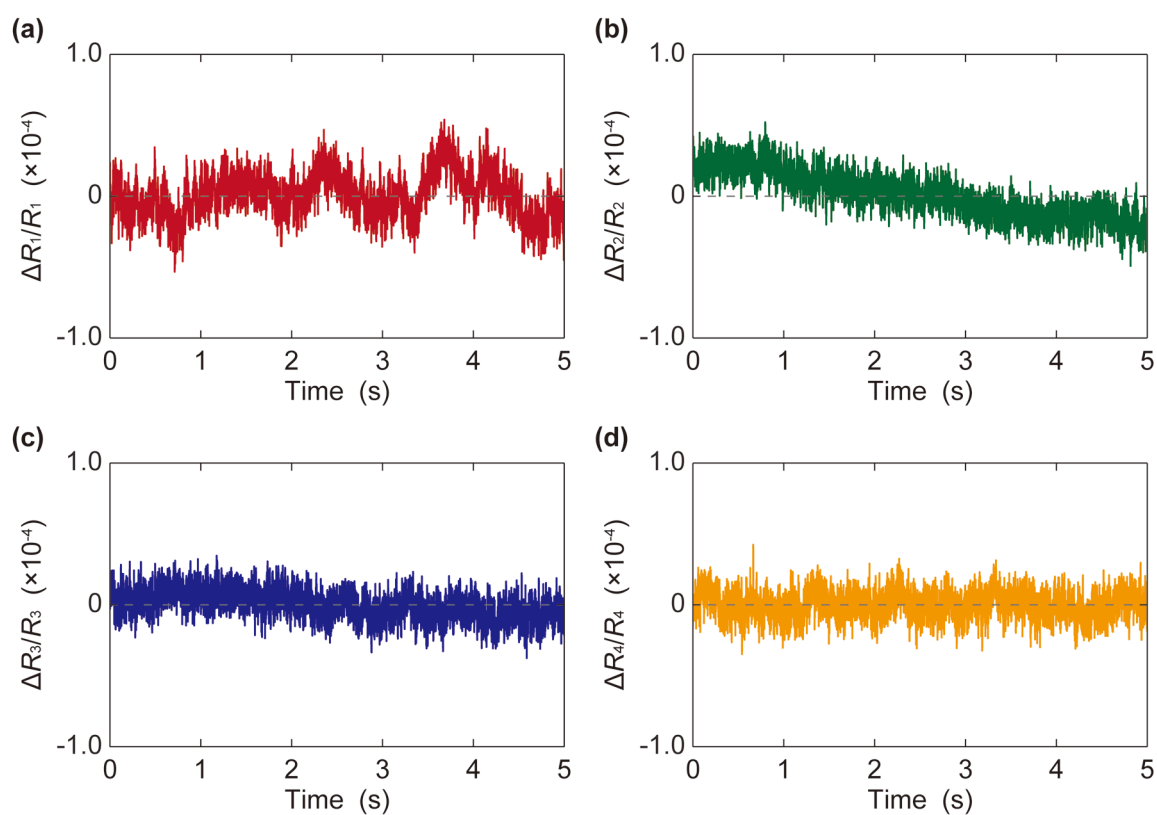
Figure 5.10 各ピエゾ抵抗層の電流電圧特性.

5.3.3 製作したセンサの構造評価

Figure 5.9 に製作したセンサの顕微鏡写真を示す. Figure 5.9(a)に示すように, センサチップが基板にスペーサを介して基板に固定されている. また, センサチップはレーザ加工によって, 設計通りに製作されていることが確認できる. さらに, 基板との接続に用いられる Au 線がピエゾ抵抗層上の Al 電極に剥離などなく接続されていることも確認できる. Figure 5.9(b)に表面支持梁の曲線部の拡大写真を示す. 梁の表面の幅は, 約 $30\ \mu\text{m}$, 裏面の幅は約 $50\ \mu\text{m}$ であり, 曲線部中心の曲率半径は $700\ \mu\text{m}$ であった. また, 前章と同様にレーザ切断によって, 梁断面が台形形状となっていることが確認されたが, その斜面角度は垂直方向から 1.9° であり, 前章と比較して傾斜が軽減されていた. Figure 5.9(c)にはカンチレバー構造の裏面の写真を示す. カンチレバー裏面にアライメントされノッチ構造が形成されており, その両端は逆テーパ構造となっている. Figure 5.9(d-i)および Figure 5.9(d-ii)に, 側面と表面ピエゾ抵抗層を示す. ピエゾ抵抗層の表面はレーザ照射による凹凸によって, Si 表面と若干色が異なって見える. どちらのピエゾ抵抗層も幅が $80\ \mu\text{m}$ であり, 設計通りに形成されていることが確認できる. また, 蒸着した電極層が, ピエゾ抵抗層の電極パッド領域内に形成されていることも確認できる. Figure 5.9(e)に, カンチレバーのノッチ構造のプロファイルを示す. 深さは約 $170\ \mu\text{m}$, 長さはノッチ構造上部が $540\ \mu\text{m}$, 底部が $800\ \mu\text{m}$ であった. また, 逆テーパ状の斜面も HNA エッチングによって比較的滑らかに形成されていた. 以上より, 三軸センサのセンサチップが提案するプロセスによって概ね設計通りに形成されていることが確認された.

Table 5.5 各ピエゾ抵抗の抵抗値と実測シート抵抗.

	Resistance [Ω]	Sheet resistance [Ω/sq]
R_1	1416	53.9
R_2	1630	110
R_3	1465	98.8
R_4	1175	44.8

Figure 5.11 各ピエゾ抵抗の無負荷時のノイズレベル. (a) R_1 , (b) R_2 , (c) R_3 , (d) R_4 の波形.

5.4 センサの特性評価

5.4.1 電流電圧特性の評価

製作したセンサの特性評価の一環として、ピエゾ抵抗層の I-V 特性を評価した. Figure 5.10

 第 5 章 液浸レーザドーピングを利用した MEMS ピエゾ抵抗型三軸力センサ

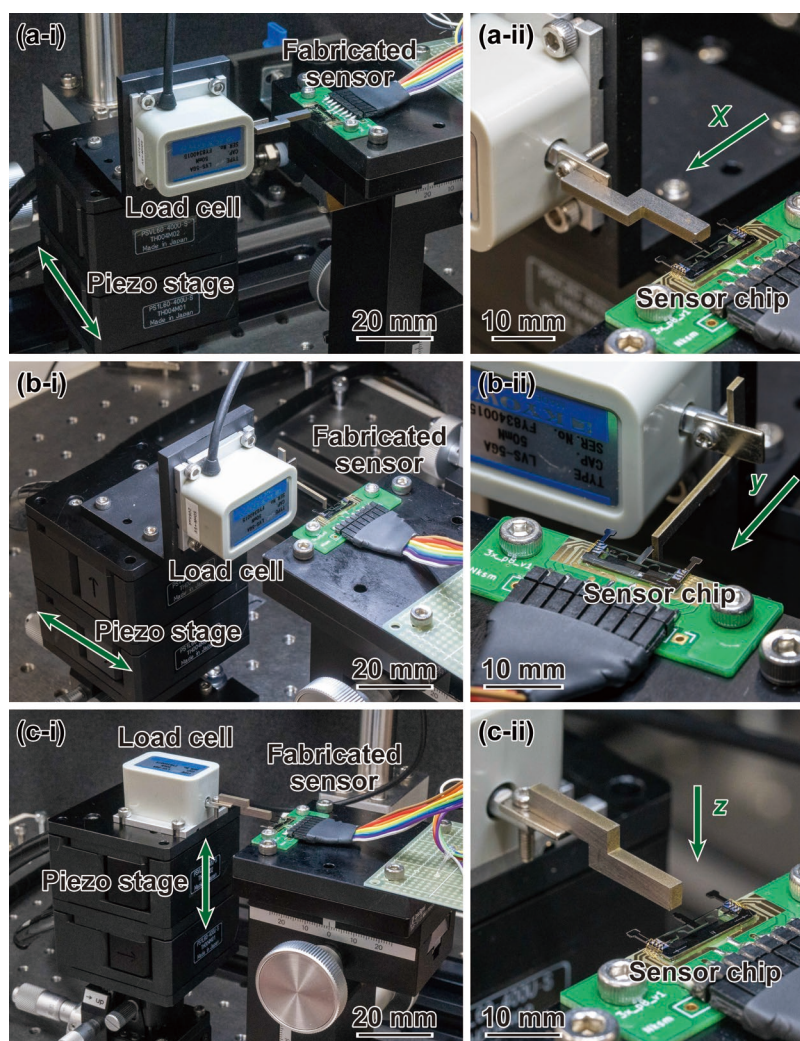


Figure 5.12 力に対する応答計測のためのセットアップ. (a) x 軸方向. (b) y 軸方向. (c) z 軸方向. (i)にはセットアップ全体を, (ii)にはセンサ周辺の拡大写真が示されている.

に -5 V から 5 V までの電圧掃引に対する電流応答を示す. I - V 特性の計測はこれまでと同様に, 四探針のソースメータを用いて室温で行った. グラフより電流と電圧の間には線形な関係が見られ, 最小二乗法による近似直線の傾きは, R_1 から R_4 の順に, $7.06 \times 10^{-4} \text{ A/V}$, $6.14 \times 10^{-4} \text{ A/V}$, $6.83 \times 10^{-4} \text{ A/V}$, $8.51 \times 10^{-4} \text{ A/V}$ であった. これらの結果から, すべてのピエゾ抵抗層と電極層の間には整流作用の無いオーミック接触であることが確認された. 製作したピエゾ抵抗層の室温での初期抵抗値を R_1 から R_4 と定義すると, それらの値はそれぞれ Table 5.5 に示す通り $1.5 \text{ k}\Omega$ 前後であった. また, 側面ピエゾ抵抗層については幅 0.08 mm , 有効長さ約 2.1 mm , 表面ピエゾ抵抗層については幅 0.08 mm , 有効長さ約 1.2 mm として算出した実測シート抵抗も併せて

 第 5 章 液浸レーザドーピングを利用した MEMS ピエゾ抵抗型三軸力センサ

示した．表面および側面のpiezo抵抗層の抵抗値は同程度であった一方，実測シート抵抗は表面piezo抵抗層の方が側面piezo抵抗層に比べて 2 倍程度高い値を示した．レーザ照射条件から概算されたフルエンスは，側面への照射時と比較して，表面への照射時の方が 1.2 倍程度高かった．このため，表面piezo抵抗層ではより高いドーピング濃度が得られ，その結果として実測シート抵抗が低下したものと考えられる．

5.4.2 ノイズレベルの評価

次に，製作したセンサのノイズレベルを評価した．以降の実験において，センサ応答として抵抗変化を計測する場合には，これまでと同様の回路構成だがチャンネル数の多いブリッジアンプ回路(AS6202, Analog Signal Technologies, Co., Ltd.)を用いてカンチレバーの抵抗変化を電圧変化に変換し，オシロスコープで計測した．また，電圧測定の際には，高周波ノイズを抑制するため，オシロスコープで 400 Hz のローパスフィルタ機能を利用した．Figure 5.11 に，外力を加えない状態で 5 s 間測定した各piezo抵抗層のノイズレベルを示す．この時のノイズに起因する抵抗変化率の実効値はそれぞれ， $\Delta R_{1,RMS}/R_1 = 1.55 \times 10^{-5}$ ， $\Delta R_{2,RMS}/R_2 = 1.66 \times 10^{-5}$ ， $\Delta R_{3,RMS}/R_3 = 1.02 \times 10^{-5}$ ， $\Delta R_{4,RMS}/R_4 = 9.31 \times 10^{-6}$ であった．これらの値はこれまでに評価したpiezo抵抗型センサと同程度のノイズレベルである．

5.4.3 入力した力に対する応答評価

最後に，製作したセンサの応答特性について評価した．Figure 5.12 に力の印加に使用した実験セットアップを示す．本章の実験では，面内力および面外力の三軸方向の力を加える必要があるため，面内方向と面外方向の二軸で駆動するpiezoステージを用いた．piezoステージの上には，金属片を介して定格容量が 50 mN のロードセル(LVS-5GA, KYOWA ELECTRONIC INSTRUMENTS Co., Ltd.)を取り付けた．使用したロードセルは一方向の力のみ計測可能であるため，印加力の軸方向に応じて，ロードセルおよびpiezoステージの向きを変更して計測した(Figure 5.12(a-i), (b-i), (c-i))．これまでと同様にpiezoステージを三角波状に駆動させることで，ロードセル先端に取り付けられている金属片を介してセンサに力を印加した． x 軸方向の力を印加する際はプローブ先端を左右から押し(Figure 5.12(a-ii))， y 軸方向の力を印加する際はプローブを前後方向から押し(Figure 5.12(b-ii))， z 軸方向の力を印加する際はプローブ先端を上下から押すことで(Figure 5.12(c-ii))，各軸方向の正負の力を印加した．また，ロードセルの出力，piezoステージのモニタ出力，およびセンサの出力は同一のオシロスコープに入力し，すべての

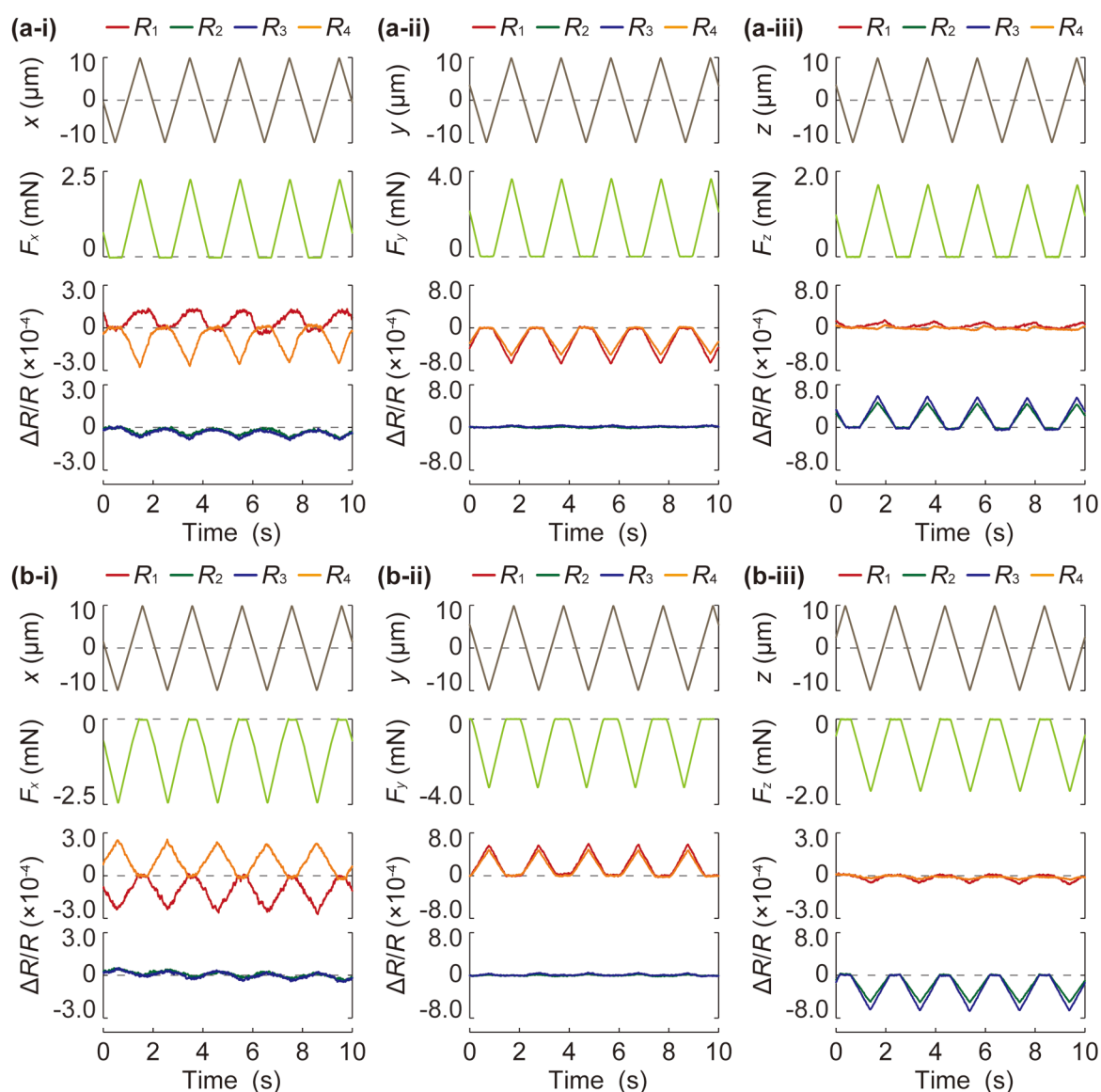


Figure 5.13 各軸方向の力に対する各ピエゾ抵抗の応答波形. (a) x 軸方向, (b) y 軸方向, (c) z 軸方向の力に対する応答. (i)は正方向, (ii)は負方向の力に対する応答を示す.

信号を同期して計測した.

Figure 5.13 に, 各軸方向の力に対する各ピエゾ抵抗の応答波形を示す. 図中, 灰色の線がピエゾステージの変位量, 黄緑色の線がロードセルにより測定された力を示している. また, 赤色, 緑色, 青色, オレンジ色の線は, それぞれピエゾ抵抗層 R_1 から R_4 における抵抗変化率を示す. なお, センサの出力信号にはカットオフ周波数 200 Hz のローパスフィルタを適用して処理

Table 5.6 実験より算出したセンサの各軸方向のばね定数.

	x-axis spring constant [N/mm]	y-axis spring constant [N/mm]	z-axis spring constant [N/mm]
k_{meas}	0.168	0.242	0.110
k_s	0.162	0.271	0.194
k_{sens}	4.54	2.33	0.254

した. ピエゾステージの変位を $\pm 10 \mu\text{m}$, 周波数 0.5 Hz の三角波として入力したところ, プローブ先端にロードセルが接触することで最大 4 mN 程度の力が印加されていることが確認された. また, センサ応答に関しても, 側面piezo抵抗である R_1 と R_4 が面内力に, 表面piezo抵抗である R_2 と R_3 が面外力に応答しており, その応答の正負もシミュレーションで予測された結果と一致していた. ただし, センサの応答には若干のドリフトが確認された. 一方で, ピエゾステージおよびロードセルの入力信号にはドリフトは認められなかったことから, このドリフトはセンサ応答に起因するものと考えられる. このとき, 抵抗変化率のドリフト量は, 1 s あたり -3.7×10^{-6} 程度であり, これを電圧変化に換算すると約 $-9.3 \times 10^{-2} \text{ mV}$ に相当する. 付録 E に示したように, ブリッジアンプ回路自体にも若干のドリフトが確認されており, その値は 1 s あたり約 $-7.5 \times 10^{-2} \text{ mV}$ であった. これらの値が同程度であることから, 本実験で観測されたドリフトは, 主としてアンプ回路に起因するものであると判断できる. 実用化に際しては, アンプ回路由来のドリフトに加え温度変化によるドリフトの補償も重要となる. デバイス表面および側面にドリフト補償用のpiezo抵抗を追加し, 差動出力を取得することで, 従来のpiezo抵抗型センサと同様の手法により, これらのドリフトを補正できると考えられる.

続いて, センサの各軸方向のばね定数を評価した. 各軸方向について, 計測された見かけのばね定数 k_{meas} , 実験セットアップのばね定数 k_s および式(3.31)から算出した, センサそのもののばね定数 k_{sens} を Table 5.6 に示す. 算出されたばね定数は, FEM シミュレーション結果と比較してオーダーおよび軸方向ごとの傾向は一致しているものの, 全体として約 20% 程度大きく見積もられる結果となった. ここの差異は, シミュレーションにおける固定拘束条件の理想化や, モデル中のエッジ形状およびラウンド部が実際のセンサ形状を厳密には再現できていないことに起因すると考えられる. 加えて, 本実験では, 実験セットアップのばね定数 k_s がセンサ自身のばね定数 k_{sens} と同程度のオーダーであったため, 式(3.31)に基づく換算において誤差が相対的に増幅された可能性がある. ただし, ばね定数の大小関係はシミュレーション結果と整合しており, センサ構造が設計およびシミュレーションで想定した変形の傾向を示していることが確認された.

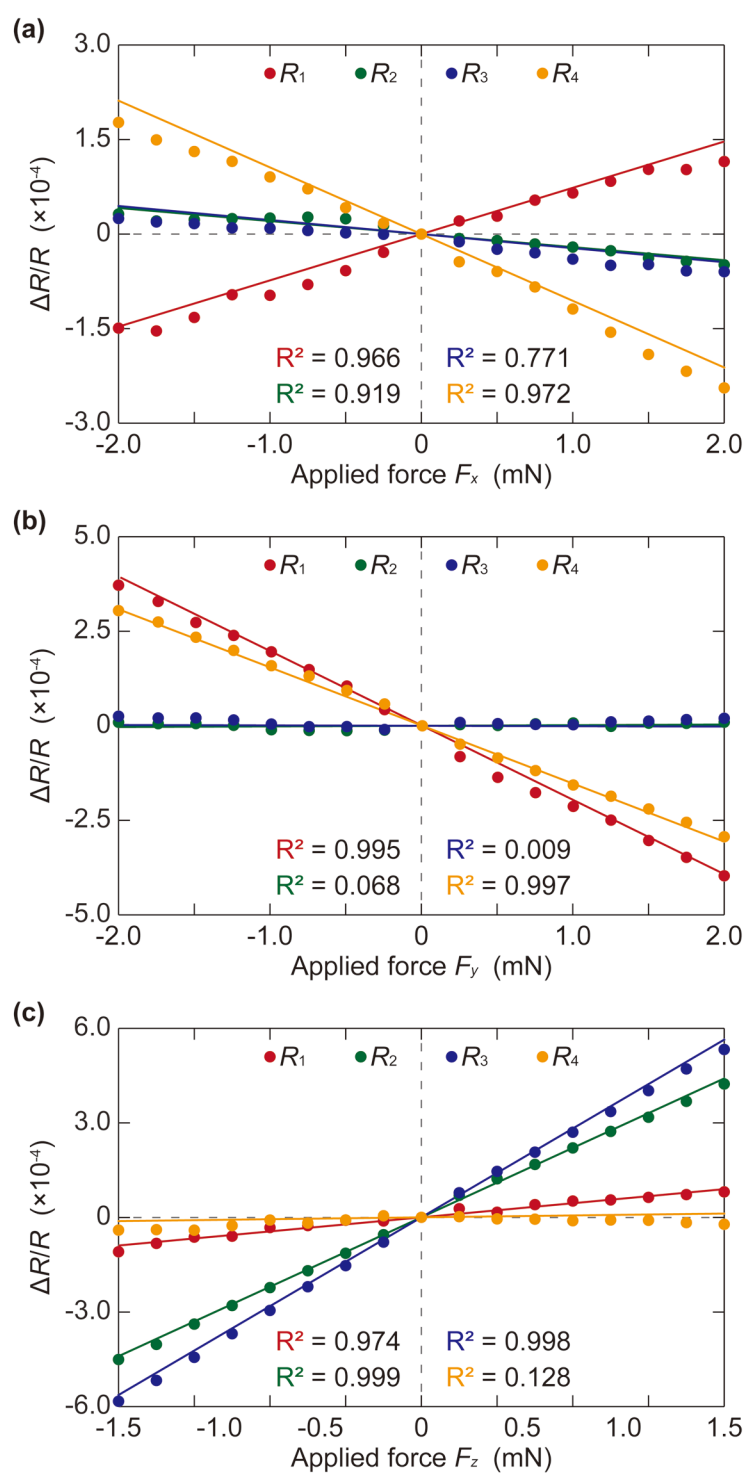


Figure 5.14 製作した三軸力センサの応答特性. (a) x 軸方向, (b) y 軸方向, (c) z 軸方向の力に対する応答.

 第 5 章 液浸レーザドーピングを利用した MEMS ピエゾ抵抗型三軸力センサ

Table 5.7 各ピエゾ抵抗のシミュレーションより概算されたゲージ率.

	Gauge factor estimated from the x-axis force [-]	Gauge factor estimated from the y-axis force [-]	Gauge factor estimated from the z-axis force [-]
R_1	-10.2	-11.4	-
R_2	-	-	-27.7
R_3	-	-	-35.5
R_4	-14.8	-8.9	-

Figure 5.14 に各軸力に対する、各ピエゾ抵抗の抵抗変化率の関係を示す．本グラフは、正方向および負方向の力に対する応答を組み合わせで作成したものである． x 軸および y 軸方向については -2 mN から 2 mN 、 z 軸方向に関しては -1.5 mN から 1.5 mN の範囲で力を印加し、それぞれの力範囲を 16 分割した区間ごとに平均値を算出してプロットした．各軸方向の力に対して、対応するピエゾ抵抗層が概ね線形に応答していることが確認できる．Figure 5.14(a)に F_x を印加した際の抵抗変化率を示す． R_1 および R_4 が主に応答し、それぞれ正および負方向の応答を示した．最小二乗法に近似した直線の傾きは、それぞれ $0.734 \times 10^{-4}/\text{mN}$ および $-1.06 \times 10^{-4}/\text{mN}$ であった．この時、 R_2 および R_3 も負の応答を示したが、その力感度は R_1 および R_4 の 1/5 程度であった．同様に、Figure 5.14(b)に F_y を印加した際の抵抗変化率を示す． R_1 および R_4 が主に応答し、いずれも負方向の応答を示した．最小二乗法によって近似した直線の傾きは、それぞれ $-1.96 \times 10^{-4}/\text{mN}$ および $-1.53 \times 10^{-4}/\text{mN}$ であった．一方、 R_2 および R_3 の応答は小さく、力感度は R_1 および R_4 の 1/100 以下であった．Figure 5.14(c)に F_z を印加した際の抵抗変化率を示す． R_2 と R_3 が主に応答し、いずれも正方向の応答を示した．最小二乗法によって近似した直線の傾きは、それぞれ $2.94 \times 10^{-4}/\text{mN}$ および $3.76 \times 10^{-4}/\text{mN}$ であった．この時、 R_1 および R_4 は正の応答を示したが、 R_1 の力感度は R_2 および R_3 の 1/6 程度、 R_4 の力感度は 1/30 程度であった．

また、単位変位当たりの抵抗変化率と、FEM シミュレーションから得られた単位変位当たりの表面平均ひずみを用いて、ゲージ率を概算した．結果を Table 5.7 に示す．各軸方向の力に対して主に応答するピエゾ抵抗層のみを対象として評価を行った．側面ピエゾ抵抗層に関しては、ゲージ率は概ね-10 程度となり、表面ピエゾ抵抗層に関しては、ゲージ率は概ね-30 程度となった．これらの値は、第 3 章で形成した表面ピエゾ抵抗層および第 4 章で形成した側面ピエゾ抵抗層と同様の傾向を示している．これらの結果より、平滑なセンサチップ表面に形成されたピエゾ抵抗層と、レーザ切断後の凹凸を有するセンサチップ側面に形成されたピエゾ抵抗層とを比較すると、平滑面に形成されたピエゾ抵抗層の方が高いゲージ率を示す傾向があることが予想される．

 第5章 液浸レーザードーピングを利用した MEMS ピエゾ抵抗型三軸力センサ

また、印加する軸方向によって、同一のピエゾ抵抗層であっても算出されるゲージ率に差異が生じた。これは、実験時の力の入力方向や接触条件を、シミュレーション上で完全には再現できていないことに起因すると考えられる。その結果、左右方向や各軸方向で異なるひずみ分布が生じ、見かけ上、ゲージ率の差異として現れたものと推察される。さらに、本章におけるゲージ率の評価は、単純なカンチレバー構造ではなく、複雑な三次元構造に対してシミュレーション結果と実験結果を組み合わせることで算出したものであるため、一定の誤差を含む可能性がある。

以上の実験結果より、式(5.1)で定義された特性行列 $\mathbf{C}$ は以下のように表される。

$$\begin{pmatrix} \Delta R_1/R_1 \\ \Delta R_2/R_2 \\ \Delta R_3/R_3 \\ \Delta R_4/R_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.734 & -1.96 & 0.597 \\ -0.207 & 0.0162 & 2.94 \\ -0.223 & 0.0102 & 3.76 \\ -1.06 & -1.53 & 0.0799 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} \times 10^{-4} \quad (5.4)$$

この時、力の単位は mN である。このように、各力に対して応答するピエゾ抵抗層の力感度はすべて同一オーダーとなり、その差は最大でも 5 倍に収まった。したがって、プローブ先端に印加される三軸力は、以下の校正行列 $\mathbf{C}^{-1}$ によって抵抗変化率から算出することが可能である。

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} = \mathbf{C}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta R_1/R_1 \\ \Delta R_2/R_2 \\ \Delta R_3/R_3 \\ \Delta R_4/R_4 \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} 4.71 & -0.422 & -0.289 & -6.04 \\ -3.24 & 0.284 & 0.342 & -2.38 \\ 0.311 & 1.26 & 1.63 & -0.375 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta R_1/R_1 \\ \Delta R_2/R_2 \\ \Delta R_3/R_3 \\ \Delta R_4/R_4 \end{pmatrix} \times 10^3 \quad (5.5)$$

次に、各軸の独立性を評価するために、ベクトル同士の方向の類似性を表すコサイン類似度を用いて評価した [97]。ここで特性行列 $\mathbf{C}$ の j 列目のベクトル $\mathbf{c}_j$ は、1 列目は x 軸、2 列目は y 軸、3 列目は z 軸方向の単位力に対する 4 つのピエゾ抵抗の感度ベクトルを表す。これらの列ベクトル $\mathbf{c}_j$ は、各軸方向の力に対する各ピエゾ抵抗の感度パターンを表しており、各軸の独立性はこれらの感度ベクトル同士の直交性に対応する。これら 3 本の感度ベクトル間のコサイン類似度 $\mathbf{S}(\mathbf{C})$ を求めたところ以下の通りであった。

$$\mathbf{S}(\mathbf{C}) = \begin{pmatrix} 1.00 & 0.053 & -0.17 \\ 0.053 & 1.00 & -0.10 \\ -0.17 & -0.10 & 1.00 \end{pmatrix} \quad (5.6)$$

ただし、コサイン類似度 $\mathbf{S}(\mathbf{C})$ の各要素は以下のように求められる。

$$S_{ij} = \frac{\mathbf{c}_i \cdot \mathbf{c}_j}{\|\mathbf{c}_i\| \|\mathbf{c}_j\|} \quad (5.7)$$

 第5章 液浸レーザドーピングを利用した MEMS ピエゾ抵抗型三軸力センサ

そのため、各軸の応答が完全に独立であれば、コサイン類似度 $\mathbf{S}(\mathbf{C})$ は単位行列となる。また、求められたコサイン類似度 $\mathbf{S}(\mathbf{C})$ を、角度に換算すると以下の通りになる。

$$\boldsymbol{\theta}(\mathbf{C}) = \begin{pmatrix} 0 & 87 & 100 \\ 87 & 0 & 96 \\ 100 & 96 & 0 \end{pmatrix} \quad (5.8)$$

x 軸と y 軸の感度ベクトルは互いに約 87° 、 x 軸と z 軸は互いに約 100° 、 y 軸と z 軸は互いに約 96° の角度をなしており、各軸間には一定の独立性が確保されていることが確認された。

x 軸と y 軸入力に対する感度ベクトルは互いに約 87° の角度をなしており、三組の中で最も直交性が高い結果となった。これは、 x 軸および y 軸方向の力に対して主に応答するピエゾ抵抗層は R_1 と R_4 と共通であるものの、両軸入力時における支持梁構造の変形様式が異なるためと考えられる。製作したセンサの場合では R_1 に生じるひずみ分布が入力軸によって符号および大きさの異なる成分を持つため、感度ベクトルの向きが互いに直交に近づき、高い独立性が得られたものと考えられる。

一方で、 x 軸と z 軸入力に対する感度ベクトルのなす角は約 100° であり、本センサにおいて最も直交性が低い組み合わせとなった。これは、 x 軸入力時に生じる支持梁の曲げ変形に伴い、側面ピエゾ抵抗層に加えて表面ピエゾ抵抗層にもひずみが生じ得るためと考えられる。また、本センサでは z 軸方向のばね定数が x 軸および y 軸方向と比較して小さいため、 x 軸入力時にわずかな z 軸成分が含まれた場合であっても、 z 軸方向の変形が相対的に大きく生じやすい。その結果として x 軸と z 軸の感度ベクトル間の直交性が、他の軸の組み合わせと比べて低下したのと考えられる。さらに、実験セットアップの構成やセンサチップの基板への取り付け時における水平度のわずかな誤差により、純粋な x 軸方向の力入力が困難となり、クロストークが生じた可能性も否定できない。

y 軸と z 軸入力に対する感度ベクトルは約 96° の角度をなしており、 x 軸と z 軸の場合と比較すると直交性は改善されているものの、完全には直交していない。本センサでは、側面ピエゾ抵抗層と表面ピエゾ抵抗層は異なる力成分に対して主に感度を持つ構成であるが、 z 方向荷重に対して本来 y 成分に対応する R_1 が応答していることが確認された。このことから、ピエゾ抵抗形成時のアライメント誤差に起因するクロストークが、 y 軸と z 軸間の直交性を損なう主要因であると考えられる。ただし、 R_4 の応答感度は R_1 より 1 桁小さいため、アライメント誤差を低減することで、 y 軸と z 軸間の直交性はさらに向上する可能性が高い。以上より、各軸入力に対する感度ベクトルは概ね 90° に近い角度をなしており、いずれの軸の組み合わせにおいても一定程度の独立性が確保されていることが確認された。このことから、製作したセンサは、三軸方向の力を独立性をもって計測可能であることが示された。

 第 5 章 液浸レーザドーピングを利用した MEMS ピエゾ抵抗型三軸力センサ

最後に、本センサの分解能を評価した。5.4.2 節より、4 つのピエゾ抵抗の内、ノイズレベルは $\Delta R_{2,RMS}/R_2 = 1.66 \times 10^{-5}$ で R_2 が最大であったため、この値をノイズレベルの代表値として用いた。この時、力分解能は以下の式によって計算された。

$$F_{i,res} = \sqrt{d_{i1}^2 + d_{i2}^2 + d_{i3}^2 + d_{i4}^2} \times \frac{\Delta R_{RMS}}{R} \quad (5.9)$$

ここで、 d_{ij} は校正行列 $\mathbf{C}^{-1}$ の行列要素であり、例えば d_{11} は、 4.71×10^3 mN である。また、校正行列 $\mathbf{C}^{-1}$ の i 行目は力の方向 F_i に対応するため、1 行目は x 、2 行目は y 、3 行目は z を表す。よって、分解能は以下の通りであった。

$$\mathbf{F}_{res} = \begin{pmatrix} 0.13 \\ 0.067 \\ 0.035 \end{pmatrix} \text{ mN} \quad (5.10)$$

このように、本センサは 0.1 mN 程度の微小力を検出可能であることが示された。

5.5 本章の総括

5.5.1 本章の結論

本章では、レーザドーピングを用いた多軸力センサ製作の最終段階として、デバイス表面およびデバイス側面の両方にピエゾ抵抗を形成した MEMS ピエゾ抵抗型三軸力センサを製作し、その性能について評価した。提案するプロセスは、レーザ切断およびウェットエッチングによるセンサ構造の形成と、レーザドーピングによるデバイス側面と表面へのピエゾ抵抗層のパターニング工程から構成される。第 4 章で確立した液浸レーザドーピングの特性を利用することで、デバイス側面のひずみ集中領域にのみピエゾ抵抗層を選択的に形成することが可能であった。さらに、傾斜状態での液浸側面ドーピングと、水平状態での液浸表面ドーピングにより、デバイス側面および表面へひずみ検知領域と接続領域を形成した。製作したセンサ構造は設計寸法と高い一致を示した。最終的に形成された支持梁の最小幅寸法は $40 \mu\text{m}$ であり、MEMS デバイスクラスのセンサ構造形成が可能であることが示された。また、幅 $80 \mu\text{m}$ の側面ピエゾ抵抗層および表面ピエゾ抵抗層は提案したアライメントシステムによって、センサ構造体にアライメントされ、形成されていた。製作したセンサは、面外力と面内力に対してそれぞれ表面と側面のピエゾ抵抗が想定と同じ符号で線形に応答することも確認した。また、ノイズレベルから算出した力分解能は約 0.1 mN で、シミュレーションと実験結果から概算したゲージ率は -10 を超えた。さらに、各軸方向の力に対する感度ベクトルをコサイン類似度で評価したところ、

 第 5 章 液浸レーザドーピングを利用した MEMS ピエゾ抵抗型三軸力センサ

互いに $90 \pm 10^\circ$ の角度を示し，感度ベクトル間の独立性が確認された．

本章の目的は，第 4 章で確立した液浸レーザドーピングによるピエゾ抵抗パターンニング手法を利用して，各軸方向で近い力感度と高い応答独立性を両立する MEMS ピエゾ抵抗型三軸力センサの製作手法を確立することであった．本章の結果より，製作したセンサの三軸方向の入力に対する感度ベクトル間のコサイン類似度が目標とする 0.2 を下回り，その値は 0.05 から 0.17 に収まった．よって，提案するセンサ構造およびセンサ素子配置によって，独立性の高い多軸力計測が可能であることが示された．また，力感度もすべて同じオーダーに収まっており，軸間のばらつきが小さいことが確認された．さらに，ピエゾ抵抗層，特に側面ピエゾ抵抗が形成された支持梁の梁厚が $260 \mu\text{m}$ ，梁幅は $40 \mu\text{m}$ であり，梁厚に対して梁幅が 1/5 以下となる高アスペクト比の構造が実現できることが示された．以上の結果より，本手法は，デバイス側面と表面の両方にピエゾ抵抗を有する，独立した多軸力計測が可能かつ近い力感度を有する MEMS 多軸力センサの製作手法として有用であることが示された．

5.5.2 本章の考察

本節では，製作した三軸力センサを既存の MEMS ピエゾ抵抗型力センサと比較し，提案する手法の優位性を考察する．先行研究においては，表面ピエゾ抵抗と側面ピエゾ抵抗を利用した MEMS ピエゾ抵抗型三軸力センサが報告されている [21]．本研究で製作したセンサとこの先行研究のセンサを，応答独立性および力感度の均一性という二つの観点から比較する．

Table 5.8 感度ベクトル間のコサイン類似度の比較．

	This work	H. Takahashi 2023 [21]
Cosine similarity (x - y)	0.053 (87°)	-0.40 (114°)
Cosine similarity (x - z)	-0.17 (100°)	-0.03 (92°)
Cosine similarity (y - z)	-0.10 (96°)	-0.01 (91°)

本研究と比較対象となる先行研究における三軸力センサのコサイン類似度を Table 5.8 にまとめる．ただし，括弧内はコサイン類似度を角度に換算した値である．本研究で提案したセンサは，面内力と面外力に独立して応答する側面ピエゾ抵抗と表面ピエゾ抵抗および面内力と面外力に対してそれぞれ変形しやすい高アスペクト比の支持梁構造を組み合わせた構成である．この構成により，各力成分に対して応答するピエゾ抵抗が明確に分離され，全軸のコサイン類似度は比較的小さい値に抑えられている．一方，先行研究のセンサにおいては， x - y 間のコサイン類似度が相対的に大きい．先行研究においても，側面ピエゾ抵抗と表面ピエゾ抵抗の両方に

 第 5 章 液浸レーザドーピングを利用した MEMS ピエゾ抵抗型三軸力センサ

よって多軸力を独立して計測する設計思想の下，センサが製作されている．しかし，側面ピエゾ抵抗を形成する過程で，配線用としての表面ピエゾ抵抗が同時に形成されてしまう．そのため，クロストークの低減を目的として，各側面ピエゾ抵抗は支持梁の両端，つまりプローブ側と土台構造側の両方に形成され，それらを直列に接続することで 1 つの側面ピエゾ抵抗とみなしている．この構成により，面外力に起因するクロストークはキャンセル可能である．一方で，面内力印加時には荷重方向によって有効ひずみ量が異なるという問題が生じる．具体的には， y 軸入力時には両方の側面ピエゾ抵抗に同符号のひずみが生じるため十分な感度が得られるのに対し， x 軸入力時には一方の側面ピエゾ抵抗にはひずみがあまり生じないため，有効ひずみ量が低下する．その結果， x 軸方向の感度ベクトルの大きさが相対的に小さくなり， y 軸方向の感度ベクトルに近づくため， x - y 間のコサイン類似度が大きくなったと考えられる．そのため，提案する手法を用いた側面ピエゾ抵抗パターンニングはセンサ応答の独立性向上において有用である．

Table 5.9 三軸力センサにおける力感度の均一性と構造特性の比較.

	This work			H. Takahashi 2023 [21]		
	x axis	y axis	z axis	x axis	y axis	z axis
Measured force sensitivity [$\times 10^{-4}$ /mN]	0.9	1.8	3.4	14	38	122
Simulated strain [$\times 10^{-6}$ /mN]	6.87	16.5	10.6	65	96	143
Measured spring constant [N/mm]	4.5	2.3	0.25	10.3×10^{-2}	18.4×10^{-2}	2.43×10^{-2}
Beam width [μm]	40	40	330	25	25	25
Beam thickness [μm]	260	260	90	50	50	25

次に，本研究と比較対象となる先行研究における三軸力センサの力感度と構造特性を Table 5.9 にまとめる．支持梁の幅と厚みは，各軸力計測のためのピエゾ抵抗層が形成されている位置の梁寸法であり，面内方向を支持梁の幅とした．本研究で製作したセンサは，各軸方向の力感度が同一オーダーに揃っており，軸間で大きな感度偏りが生じていないことが確認できる．一方で先行研究では， z 軸方向の力感度が x 軸および y 軸方向と比べて相対的に大きく，軸間の感度ばらつきが大きい．一方，抵抗形成位置におけるひずみ量に着目すると，本研究と先行研究の間で，軸間のばらつきは同程度であり，必ずしも本研究においてひずみのばらつきが低減して

第5章 液浸レーザドーピングを利用した MEMS ピエゾ抵抗型三軸力センサ

いるわけではない。したがって、製作したセンサにおける力感度ばらつきの低減は、ひずみ量のものの均一化によって達成されたものではない。先行研究では、側面piezo抵抗が支持梁両端に分割して形成され、それらが直列に接続される構成をとるため、ひずみによって抵抗変化が生じない領域が含まれる。その結果、抵抗変化に寄与しない部分が存在し、有効ゲージ率が低下する。これに対して本研究では、レーザドーピングを用いることで側面piezo抵抗をひずみ集中部に選択的に形成できるため、抵抗変化に寄与しない領域を排除できる。この結果、有効ゲージ率の軸間ばらつきが抑制され、力感度のばらつきが小さくなったと考えられる。また、高アスペクト比支持梁構造は、力感度ばらつきを直接的に低減する要因ではないものの、面内力および面外力に対する変形モードを明確に分離する構造条件として重要な役割を果たしている。

本研究で製作したセンサ構造は先行研究と基本的な構成は類似しているが、支持梁1本に対してセンサ素子1つを配置できる点に大きな利点がある。先行研究では三軸力計測のために4本の支持梁を用いているものの、側面へのpiezo抵抗層パターニングが困難であるため、側面piezo抵抗用に2本、表面piezo抵抗用に1本、および配線用に1本が割り当てられ、実質的には3つの力成分を3つのセンサ素子で計測する構成となっている。これに対して本研究では、三軸方向の力に対して4つのセンサ素子が割り当てられており、構造およびセンサ素子配置が左右対称となる。そのため、製作誤差や局所的な特性ばらつきに対してもロバストな構成であると考えられる。一方で、実測ばね定数の軸間ばらつきは先行研究の方が小さい。本研究では、高アスペクト比支持梁構造を実現できる製作自由度を有していることから、今後は梁寸法の最適化によりばね定数ばらつきの低減が可能であると考えられる。

以上の結果から、本研究では、構造設計とpiezo抵抗配置を適切に組み合わせることで、力感度の軸間ばらつきを抑制できることが示された。

第6章 結論

6.1 本研究の結論

本研究では，レーザドーピングを用いて，多軸力入力に対して高い独立性と力感度の均一性を両立する MEMS ピエゾ抵抗型多軸力センサの製作手法を確立した．本手法の特徴は，従来の MEMS プロセスでは困難であったデバイス側面へのpiezo抵抗パターンニングを可能とし，面内方向に変形しやすい高アスペクト比の支持梁側面に存在するひずみ集中部へ，センサ素子を選択的に配置できる点にある．

piezo抵抗を任意の二次元形状に形成可能なレーザドーピングに着目し，センサ表面およびセンサ側面へのpiezo抵抗パターンニング手法を段階的に確立した．まず，固相ドーパントを用いた表面レーザドーピングにより，センサ素子として十分有用な感度を有する，ゲージ率の値が 15 を超えるpiezo抵抗層を形成できることを示した．さらに，表面レーザドーピングとレーザ切断，レーザエッチングを組み合わせることで，面外方向の力に応答するpiezo抵抗型 MEMS カンチレバーが実際に製作可能であることを実証した．次に，液浸レーザドーピングを導入することで，デバイス側面のひずみ集中部にpiezo抵抗層を選択的に形成できる側面piezo抵抗パターンニング手法を確立した．本手法では，配線用支持梁を介することなく，側面piezo抵抗を土台構造表面へ直接配線することが可能である．また，液浸レーザドーピングによって形成した側面piezo抵抗層においても，センサ素子として十分有用な 13 を超えるゲージ率が得られることを確認した．さらに，液浸レーザドーピングとレーザ切断プロセスを組み合わせることで，側面piezo抵抗が形成された支持梁においても，高アスペクト比構造を有し，面内方向の力に高感度に応答するpiezo抵抗型カンチレバーが実現可能であることを示した．最終的に，確立した液浸レーザドーピングによるpiezo抵抗パターンニング手法を用いて，各軸方向で近い力感度と高い応答独立性を両立する MEMS ピエゾ抵抗型三軸力センサを製作した．製作したセ

第6章 結論

ンサでは、感度ベクトル間のコサイン類似度がすべての軸間で 0.17 以下となり、高い独立性が確認された。また、形成されたすべてのピエゾ抵抗層において、ゲージ率の絶対値が 10 を超えセンサとして十分有用な感度を有することを確認した。その結果、各軸方向において同一オーダの力感度が得られ、極端な感度偏りが生じないことを示した。さらに、側面ピエゾ抵抗層が形成された支持梁において、梁厚に対して梁幅が $1/6$ 以下となる高アスペクト比構造が実現された。その結果、各軸方向において同一オーダの力感度が得られ、センサは極端な感度偏りが生じなかった。よって、提案する手法が目的とする MEMS ピエゾ抵抗型多軸力センサ製作に有効であることを明らかにした。

6.2 今後の展望

本研究により、提案するレーザドーピングを用いた MEMS ピエゾ抵抗型多軸力センサの製作手法の有効性は示された。一方で、本手法をさらに改善・最適化することで、より高感度かつ高精度な多軸力センサの実現が可能であると考えられる。今後の展望としては、主にセンサ構造の高度化と、センサ素子の高感度化の二点が挙げられる。

センサ構造に関しては、レーザ加工における加工精度と描画範囲がトレードオフの関係にあることから、デバイス寸法に応じて加工範囲の狭いレンズを用いることで、構造寸法のさらなる微細化が期待できる。また、本研究では主に表面および裏面からのレーザ加工を用いて構造形成を行ったが、側面方向からの穴加工や溝加工を組み合わせることで、三次元的により独立した変形モードを有するセンサ構造の設計も可能になると考えられる。さらに、センサ構造を MEMS プロセスで形成した後にレーザ加工によってノッチ構造などを付加することで、より高アスペクト比の支持梁を有する構造を実現できる可能性がある。これにより、ばね定数を低減し、計測可能な力レンジをより小さくすることが期待される。

センサ素子形成に関しては、アライメント精度の向上と、レーザドーピングに伴う結晶性低下の抑制が今後の課題である。現在観測されているアライメント誤差は、主に基板の傾きや角度ずれに起因すると考えられるため、単一カメラによる位置合わせではなく、水平方向に複数のカメラを配置したアライメント系を導入することで、角度起因の誤差低減が可能であると考えられる。また、結晶性低下については、パルス幅の長いレーザを用いることで適正フルエンスの許容範囲を拡大し、照射条件の最適化を図ることが有効である。加えて、レーザ波長を可視光領域に短波長化することでスポット径を縮小し、より微細なピエゾ抵抗層を形成できる可能性もある。

第6章 結論

また、液浸レーザドーピングは、側面と表面に連続したピエゾ抵抗層を形成できるという利点を有する一方で、気泡の発生や局所的なアモルファス化が生じる場合がある。これに対する代替手法として、ガス雰囲気中でのレーザドーピングや、化学成膜法によってあらかじめドーパント源を形成した後にレーザ照射を行う手法も考えられる。ただし、これらの手法では装置構成や工程が複雑化する点に加え、側面から表面に連続したピエゾ抵抗層を形成する際の被膜性など、新たな課題が生じる可能性がある。

さらに、従来の MEMS プロセスでは、構造形成やドーピングごとに専用の半導体製造装置やリソグラフィ工程が必要であった。これに対して本手法では、構造形成およびセンサ素子形成のいずれもレーザ照射のみで実施可能であり、走査パスの変更によって構造形状およびセンサ素子配置を柔軟に設計できる。また、設計変更から試作までのリードタイムも短いことから、本手法は MEMS ピエゾ抵抗型センサのラピッドプロトタイピング技術としての応用も期待される。

謝辞

本論文の内容は、著者が慶應義塾大学大学院理工学研究科総合デザイン工学専攻に在籍中に、同専攻マルチディシプリナリ・デザイン科学専修の高橋英俊准教授のご指導の下で行った研究をまとめたものです。

指導教員である高橋英俊准教授には、研究計画に関する相談や、実験装置やソフトウェアの使用方法のご指導、論文の添削、学会に向けた発表練習など、お忙しい中でも常に丁寧にご対応いただきました。また、どんな些細な質問に対しても真摯にお答えいただきました。さらに、高橋准教授のご尽力により、他大学や産業技術総合研究所での研究活動の機会を得ることができ、その経験が本研究の発展に大きく寄与したと考えております。6年間にわたりご指導いただいたことに対し、心より感謝申し上げます。

尾上弘晃教授、竹村研治郎教授、閻紀旺教授には、博士論文の執筆にあたり、副査として大変貴重なご指摘とご助言をいただきました。特に、尾上教授からはマイクロ工学の観点から、竹村教授からは研究全体の設計および論理構成に関して、閻教授からはレーザー加工の観点からご指摘をいただき、本論文をより一層深化させることができました。ここに深く感謝申し上げます。

三木則尚教授には、本研究の遂行に欠かせないクリーンルームをお貸しいただきました。裁量の大きい環境のもとで高頻度に利用させていただけたことで、本研究を大きく進展させることができました。誠にありがとうございました。

大宮正毅教授、佐野友彦専任講師には、修士課程における研究を進めるにあたり、実験装置をお貸しいただくとともに、多くの有益なご助言をいただき、大変お世話になりました。修士課程での研究経験が、現在の博士課程における研究へとつながっております。感謝申し上げます。

謝辞

産業技術総合研究所の竹井裕介様には、RA として受け入れていただき、その結果、多くの貴重な経験を積むとともに、自身の研究を大いに発展させることができました。また、学振申請書の添削や、博士課程修了後の進路に関するご相談にも親身に対応していただきました。深く感謝申し上げます。岡本有貴様には、クリーンルームにおける基本的な所作から、様々な半導体製造装置を用いた MEMS プロセスに至るまで、幅広くご指導いただきました。さらに、大学のクリーンルーム設計においても、ご教示いただいた内容を反映したことで、より良い環境を構築することができました。岡本様のご助言は本研究の遂行に欠かせないものであり、半導体および半導体製造に関して深い関心を持つきっかけともなりました。心より感謝申し上げます。Gorwadkar Sucheta 様には、本研究におけるウェットプロセスについて、特に多くのご助言をいただきました。また、プロセスを丁寧に進めることや、作業内容を詳細に記録することの重要性をご教示いただき、研究に対する姿勢の面で大きな学びを得ました。感謝申し上げます。ここにお名前をすべて挙げることはできませんが、産業技術総合研究所においてお世話になった多くの皆様に、深く感謝申し上げます。

電気通信大学の菅哲朗教授には、本研究の実施にあたり、予備検討のための材料をご提供いただきました。それをきっかけとして、本研究に着手することができました。その後も、本研究にご関与いただき、学会投稿や論文執筆の際には原稿を丁寧にご確認くださいとともに、貴重なご助言をいただいたこときしました。ここに感謝申し上げます。

早稲田大学の岩瀬英治教授には、修士課程での研究を進めるにあたり、レーザ加工機をお貸しいただきました。それがきっかけとなり、博士課程への進学や現在の研究へとつながっております。大変ありがとうございました。

マニファクチュアリングセンターの吉田久展様、近藤善幸様、渡邊和憲様、大谷尚文様には、研究において必要となる様々な金属治具を製作していただきました。不完全な図面や特殊な設計の治具製作などにより、多大なご迷惑をおかけしてしまい、大変申し訳ございませんでした。製作していただいた治具がなければ、本研究を遂行することはできませんでした。深く感謝申し上げます。

中央試験所の村上寛幸様、土屋真裕子様には、SEM, TEM, XRD などの分析装置の使用方法をご教示いただくとともに、取得データの解釈に関してもご相談に乗っていただきました。誠にありがとうございました。

産総研ナノプロセッシング施設の大塚照久様、清水三聡様には、SIMS 分析において大変お世話になりました。センサチップ側面の計測という特殊な計測条件にもかかわらず、迅速にご対応いただき、誠にありがとうございました。

謝辞

高橋研究室の技術補佐員である仲村隆様には、電子回路および基板製作に関して多くの有益なアドバイスをいただきました。また、高橋研究室の秘書である中島恭子様、杉山由美子様には、学会参加に伴う精算業務や研究費の管理など、多岐にわたり大変お世話になりました。お二人のお力添えのおかげで、研究および学会参加を円滑に進めることができました。ここに深く感謝申し上げます。

産総研の佐藤峻さんには、学会でお会いするたびに気さくに声をかけていただきました。また、懇親の場においても場を和ませ、学生同士のつながりを築いてくださいました。研究発表においても多くの刺激を受けました。大変ありがとうございました。

杉本匠さん、和田路加さんには、高橋研究室の1期生として研究室の礎を築いていただきました。論文の書き方や装置の使い方など、研究の基礎となる部分を丁寧に教えていただき、気軽に相談できる先輩の存在のありがたさを強く実感いたしました。大変ありがとうございました。

尾上研究室の村松淳平さん、稲見文香さんには、蒸着装置やデシケータをはじめとする実験装置の使用およびメンテナンスについてご指導いただき、感謝申し上げます。また、村松さんとは、ご卒業後に博士課程として研究室に戻られてから、互いの研究進捗について話し合う機会を持つことができ、精神的な支えとなっていました。誠にありがとうございました。

高橋研究室の博士課程の皆様にも感謝申し上げます。まず、6年間ともに研究に取り組んできた同期の岸本卓大君には、最大限の感謝を申し上げます。研究に日々邁進し、様々なことに挑戦する姿から多くの刺激を受け、自身の研究にも真摯に取り組むことができました。本当にありがとうございました。香川学斗君には、高橋研究室のムードメーカーとして先輩と後輩の橋渡しをしてくれたことに加え、国際学会発表における英語原稿やスライド作成についても助言していただき、感謝しております。白鳥俊宏君は、国際学会で出会った当初は他大学の学生でしたが、高橋研究室に加わっていただき、研究室の発展に貢献していただきました。ハードな条件出しをこなしつつ、常に成果を出し続ける姿が印象的でした。嶋田恭大君は、ソフトウェア分野に強く、自分にはない視点で研究に取り組む姿勢に加え、国際学会における積極的な異文化交流にも感銘を受けました。中原行健君は、誰とでも分け隔てなく交流できる姿勢が印象的で、見習うべき点が多くありました。また、レーザ加工機のアライメント機構の製作にも多大な貢献をしてくれました。村上健太さんは、来年度より博士課程に進学され、レーザ加工に関する研究の一部を引き継いでいただけることを大変嬉しく思っております。社会人としてのお仕事と両立しながら、大学では集中して研究に取り組まれる姿勢に刺激を受けました。

同期の川崎裕太君、羽田耕太郎君、水越文也君には、高橋研究室の2期生として研究室の立

謝辞

ち上げをともに支えていただきました。コロナ禍で思うように研究が進まない時期もありましたが、それぞれ異なる研究テーマに取り組む姿から刺激を受け、自身の研究を継続する励みとなりました。誠にありがとうございました。

岩瀬研究室の中村風君、尾上研究室の益田緋里さん、山形智咲さん、菅研究室の金田裕喜君には、国内外の学会において親しく交流していただき、感謝申し上げます。同じ学会に参加することを一つの目標として、研究に励むことができたと考えております。

後輩の小田怜君、小原慧君、佐藤颯哉君とは、産総研 RA として MEMS プロセスに取り組んだ日々を忘れません。皆で協力して取り組んだからこそ、様々な経験を積むことができたと思っております。大変ありがとうございました。

高橋研究室の後輩の皆様には、研究活動および研究室運営において多くの協力をいただきました。各自が自身の研究テーマに責任を持って研究に取り組むという研究室の基本姿勢が共有されており、そのような活発な研究環境のもとで研究を進めることができたことに、感謝申し上げます。

家族には、生活面で多くの支援をしていただき、研究に集中できる環境を整えてもらいました。研究が思うように進まず不安を感じたときも、最も身近な存在として励まし支えていただいたおかげで、研究室での 6 年間を乗り越えることができたと思っております。心より感謝申し上げます。また、来年度から新たな環境において、一から努力していきたいと思っております。

本研究に関わっていただいたすべての方々のお名前を挙げることはできませんが、皆様に心より感謝しております。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Y. Yang, M. Zhao, H. Yinguo, H. Zhang, N. Guo, and Y. Zheng, “Micro-force sensing techniques and traceable reference forces: a review,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 33, no. 11, Art. no. 114010, Nov. 2022, doi: 10.1088/1361-6501/ac83e1.
- [2] A. Saudabayev and H. A. Varol, “Sensors for robotic hands: A survey of state of the art,” *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1765–1782, 2015, doi: 10.1109/access.2015.2482543.
- [3] R. V. Patel, S. F. Atashzar, and M. Tavakoli, “Haptic feedback and force-based teleoperation in surgical robotics,” *Proc. IEEE Inst. Electr. Electron. Eng.*, vol. 110, no. 7, pp. 1012–1027, Jul. 2022, doi: 10.1109/jproc.2022.3180052.
- [4] M. S. Bartsch, W. Federle, R. J. Full, and T. W. Kenny, “A multiaxis force sensor for the study of insect biomechanics,” *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 16, no. 3, pp. 709–718, Jun. 2007, doi: 10.1109/jmems.2007.893677.
- [5] J. Rajagopalan and M. T. A. Saif, “MEMS sensors and microsystems for cell mechanobiology,” *J. Micromech. Microeng.*, vol. 21, no. 5, pp. 54002–54012, Mar. 2011, doi: 10.1088/0960-1317/21/5/054002.
- [6] P. Pan, W. Wang, C. Ru, Y. Sun, and X. Liu, “MEMS-based platforms for mechanical manipulation and characterization of cells,” *J. Micromech. Microeng.*, vol. 27, no. 12, Art. no. 123003, Dec. 2017, doi: 10.1088/1361-6439/aa8f1d.
- [7] Q. Liang, D. Zhang, G. Coppola, Y. Wang, S. Wei, and Y. Ge, “Multi-dimensional MEMS/micro sensor for force and moment sensing: A review,” *IEEE Sens. J.*, vol. 14, no. 8, pp. 2643–2657, Aug. 2014, doi: 10.1109/jsen.2014.2313860.

参考文献

- [8] R. Hajare, V. Reddy, and R. Srikanth, “MEMS based sensors – A comprehensive review of commonly used fabrication techniques,” *Mater. Today*, vol. 49, pp. 720–730, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.05.223.
- [9] M. J. Madou, *Fundamentals of microfabrication: The science of miniaturization, second edition*, 2nd ed. London, England: CRC Press, 2002. doi: 10.1201/9781482274004.
- [10] S. Bütefisch, S. Büttgenbach, T. Kleine-Besten, and U. Brand, “Micromechanical three-axial tactile force sensor for micromaterial characterisation,” *Microsyst. Technol.*, vol. 7, no. 4, pp. 171–174, Nov. 2001, doi: 10.1007/s005420000083.
- [11] M. A. Cullinan, R. M. Panas, and M. L. Culpepper, “A multi-axis MEMS sensor with integrated carbon nanotube-based piezoresistors for nanonewton level force metrology,” *Nanotechnology*, vol. 23, no. 32, Art. no. 325501, Aug. 2012, doi: 10.1088/0957-4484/23/32/325501.
- [12] K. Watatani, K. Terao, F. Shimokawa, and H. Takao, “Planar-type MEMS tactile sensor integrating micro-macro detection function of fingertip to evaluate surface touch sensation,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 58, no. 9, Art. no. 097002, Sep. 2019, doi: 10.7567/1347-4065/ab3903.
- [13] Y. Sun, B. J. Nelson, D. P. Potasek, and E. Enikov, “A bulk microfabricated multi-axis capacitive cellular force sensor using transverse comb drives,” *J. Micromech. Microeng.*, vol. 12, no. 6, pp. 832–840, Nov. 2002, doi: 10.1088/0960-1317/12/6/314.
- [14] F. Beyeler, S. Muntwyler, and B. J. Nelson, “A six-axis MEMS force–torque sensor with micro-newton and nano-newtonmeter resolution,” *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 18, no. 2, pp. 433–441, Apr. 2009, doi: 10.1109/jmems.2009.2013387.
- [15] S. Muntwyler, F. Beyeler, and B. J. Nelson, “Three-axis micro-force sensor with sub-micro-Newton measurement uncertainty and tunable force range,” *J. Micromech. Microeng.*, vol. 20, no. 2, Art. no. 025011, Feb. 2010, doi: 10.1088/0960-1317/20/2/025011.
- [16] S. Pevec and D. Donlagic, “Miniature all-fiber force sensor,” *Opt. Lett.*, vol. 45, no. 18, pp. 5093–5096, Sep. 2020, doi: 10.1364/OL.401690.
- [17] M. Zou, C. Liao, S. Liu, C. Xiong, C. Zhao, J. Zhao, Z. Gan, Y. Chen, K. Yang, D. Liu, Y. Wang, and Y. Wang, “Fiber-tip polymer clamped-beam probe for high-sensitivity nanoforce measurements,” *Light Sci. Appl.*, vol. 10, no. 1, Art. no. 171, Aug. 2021, doi: 10.1038/s41377-021-00611-9.
- [18] J. O. Templeman, B. B. Sheil, and T. Sun, “Multi-axis force sensors: A state-of-the-art review,” *Sens. Actuators A Phys.*, vol. 304, Art. no. 111772, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.sna.2019.111772.

参考文献

- [19] Y. Li, T. Nishida, D. P. Arnold, and M. Sheplak, “Microfabrication of a wall shear stress sensor using side-implanted piezoresistive tethers,” in *Proc SPIE Smart Structures + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, vol. 6529, Art. no. 65290D, Apr. 2007, doi: 10.1117/12.715797.
- [20] T. Kan, H. Takahashi, N. Binh-Khiem, Y. Aoyama, Y. Takei, K. Noda, K. Matsumoto, and I. Shimoyama, “Design of a piezoresistive triaxial force sensor probe using the sidewall doping method,” *J. Micromech. Microeng.*, vol. 23, no. 3, Art. no. 035027, Mar. 2013, doi: 10.1088/0960-1317/23/3/035027.
- [21] H. Takahashi, Y. Takei, K. Noda, K. Matsumoto, and I. Shimoyama, “Triaxial piezoresistive force sensor probe with high sensitivity and stiffness using 3D notch structure,” *J. Micromech. Microeng.*, vol. 33, no. 12, Art. no. 125005, Dec. 2023, doi: 10.1088/1361-6439/ad00c6.
- [22] B. W. Chui, T. W. Kenny, H. J. Mamin, B. D. Terris, and D. Rugar, “Independent detection of vertical and lateral forces with a sidewall-implanted dual-axis piezoresistive cantilever,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 72, no. 11, pp. 1388–1390, Mar. 1998, doi: 10.1063/1.121064.
- [23] A. A. Barlian, S.-J. Park, V. Mukundan, and B. L. Pruitt, “Design and characterization of microfabricated piezoresistive floating element-based shear stress sensors,” *Sens. Actuators A Phys.*, vol. 134, no. 1, pp. 77–87, Feb. 2007, doi: 10.1016/j.sna.2006.04.035.
- [24] J. C. Doll and B. L. Pruitt, *Piezoresistor Design and Applications*, 2013th ed. New York, NY: Springer, 2013. doi: 10.1007/978-1-4614-8517-9.
- [25] S. S. Kumar and B. D. Pant, “Design principles and considerations for the ‘ideal’ silicon piezoresistive pressure sensor: a focused review,” *Microsyst. Technol.*, vol. 20, no. 7, pp. 1213–1247, Jul. 2014, doi: 10.1007/s00542-014-2215-7.
- [26] P. J. Westerik, W. J. C. Visselaar, J. W. Berenschot, N. R. Tas, J. Huskens, and J. G. E. Gardeniers, “Sidewall patterning—a new wafer-scale method for accurate patterning of vertical silicon structures,” *J. Micromech. Microeng.*, vol. 28, no. 1, Art. no. 015008, Jan. 2018, doi: 10.1088/1361-6439/aa9c20.
- [27] T. Yamamoto, H. Kubo, S. Kumagai, S. Saito, F. Sahara, K. Wasa, and M. Sasaki, “Patterning vertical sidewall for optical assembly,” *J. Opt. Microsyst.*, vol. 1, no. 02, Art. no. 023501, Mar. 2021, doi: 10.1117/1.jom.1.2.023501.
- [28] K. S. Teh, “Additive direct-write microfabrication for MEMS: A review,” *Front. Mech. Eng.*, vol. 12, no. 4, pp. 490–509, Dec. 2017, doi: 10.1007/s11465-017-0484-4.

参考文献

- [29] M. Vaezi, H. Seitz, and S. Yang, “A review on 3D micro-additive manufacturing technologies,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 67, no. 5–8, pp. 1721–1754, Jul. 2013, doi: 10.1007/s00170-012-4605-2.
- [30] I. Lodhi, D. Gajula, D. K. Brown, N. T. Roeske, D. R. Myers, W. A. Lam, A. Ansari, and O. Brand, “Piezoresistive micropillar sensors for nano-newton cell traction force sensing,” *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 33, no. 3, pp. 395–402, Jun. 2024, doi: 10.1109/jmems.2024.3382974.
- [31] N. Zhang, Z. Wang, Z. Zhao, D. Zhang, J. Feng, L. Yu, Z. Lin, Q. Guo, J. Huang, J. Mao, and J. Yang, “3D printing of micro-nano devices and their applications,” *Microsyst. Nanoeng.*, vol. 11, no. 1, p. 35, Feb. 2025, doi: 10.1038/s41378-024-00812-3.
- [32] S. Maruo and J. T. Fourkas, “Recent progress in multiphoton microfabrication,” *Laser Photon. Rev.*, vol. 2, no. 1–2, pp. 100–111, Apr. 2008, doi: 10.1002/lpor.200710039.
- [33] H. Wang, W. Zhang, D. Ladika, H. Yu, D. Gailevičius, H. Wang, C.-F. Pan, P. N. S. Nair, Y. Ke, T. Mori, J. Y. E. Chan, Q. Ruan, M. Farsari, M. Malinauskas, S. Juodkasis, M. Gu, and J. K. W. Yang, “Two-photon polymerization lithography for optics and photonics: Fundamentals, materials, technologies, and applications,” *Adv. Funct. Mater.*, vol. 33, no. 39, Art. no. 2214211, Mar. 2023, doi: 10.1002/adfm.202214211.
- [34] S. Reyntjens and R. Puers, “A review of focused ion beam applications in microsystem technology,” *J. Micromech. Microeng.*, vol. 11, no. 4, pp. 287–300, Jul. 2001, doi: 10.1088/0960-1317/11/4/301.
- [35] A. A. Tseng, “Recent developments in micromilling using focused ion beam technology,” *J. Micromech. Microeng.*, vol. 14, no. 4, Art. no. R15, Jan. 2004, doi: 10.1088/0960-1317/14/4/R01.
- [36] F. Storti, S. Bonfadini, and L. Criante, “Simplified 3D hydrodynamic flow focusing for lab-on-chip single particle study,” *Sci Rep*, vol. 13, no. 1, pp. 1–10, Sep. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-40430-z.
- [37] K. Sugioka, “Hybrid femtosecond laser three-dimensional micro-and nanoprocessing: a review,” *Int. J. Extrem. Manuf.*, vol. 1, no. 1, p. 012003, Apr. 2019, doi: 10.1088/2631-7990/ab0eda.
- [38] R. B. Fair, “History of some early developments in ion-implantation technology leading to silicon transistor manufacturing,” *Proc. IEEE Inst. Electr. Electron. Eng.*, vol. 86, no. 1, pp. 111–137, Jan. 1998, doi: 10.1109/5.658764.

参考文献

- [39] E. Napolitani and G. Impellizzeri, “Ion implantation defects and shallow junctions in Si and Ge,” in *Semiconductors and Semimetals*, vol. 91, Elsevier, 2015, pp. 93–122. doi: 10.1016/bs.semsem.2015.01.001.
- [40] J. Narayan, R. T. Young, and C. W. White, “A comparative study of laser and thermal annealing of boron-implanted silicon,” *J. Appl. Phys.*, vol. 49, no. 7, pp. 3912–3917, Jul. 1978, doi: 10.1063/1.325398.
- [41] M. M. Zaripov, I. B. Khaybullin, and E. I. Shtyrkov, “Annealing of ion-implanted layers under the action of laser radiation,” *Sov. Phys. Uspekhi*, vol. 19, no. 12, pp. 1032–1033, Dec. 1976, doi: 10.1070/pu1976v019n12abeh005380.
- [42] B. J. Sealy, “Laser annealing of ion implanted semiconductors,” *J. Cryst. Growth*, vol. 48, no. 4, pp. 655–665, Apr. 1980, doi: 10.1016/0022-0248(80)90276-6.
- [43] P. Baeri and E. Rimini, “Laser annealing of silicon,” *Mater. Chem. Phys.*, vol. 46, no. 2–3, pp. 169–177, Nov. 1996, doi: 10.1016/s0254-0584(97)80010-7.
- [44] T. Goto, K. Saito, F. Imaizumi, M. Hatanaka, M. Takimoto, M. Mizumura, J. Gotoh, H. Ikenoue, and S. Sugawa, “LTPS thin-film transistors fabricated using new selective laser annealing system,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 65, no. 8, pp. 3250–3256, Aug. 2018, doi: 10.1109/ted.2018.2846412.
- [45] P. Alpuim, M. F. Cerqueira, V. Iglesias, G. Machado Jr, and J. Borme, “Laser patterning of amorphous silicon thin films deposited on flexible and rigid substrates,” *Phys. Status Solidi (A)*, vol. 213, no. 7, pp. 1717–1727, Jul. 2016, doi: 10.1002/pssa.201532980.
- [46] L. Tous, J.-F. Lerat, T. Emeraud, R. Negru, K. Huet, A. Uruena, M. Aleman, J. Meersschaut, H. Bender, R. Russell, J. John, J. Poortmans, and R. Mertens, “Nickel silicide contacts formed by excimer laser annealing for high efficiency solar cells,” *Prog. Photovolt.*, vol. 21, no. 3, pp. 267–275, May 2013, doi: 10.1002/pip.2362.
- [47] P. Badalà, S. Rascunà, B. Cafra, A. Bassi, E. Smecca, M. Zimbone, C. Bongiorno, C. Calabretta, F. La Via, F. Roccaforte, M. Saggio, G. Franco, A. Messina, A. La Magna, and A. Alberti, “Ni/4H-SiC interaction and silicide formation under excimer laser annealing for ohmic contact,” *Materialia*, vol. 9, Art. no. 100528, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.mtla.2019.100528.
- [48] J. Narayan, R. T. Young, R. F. Wood, and W. H. Christie, “*p-n* junction formation in boron-deposited silicon by laser-induced diffusion,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 33, no. 4, pp. 338–340, Aug. 1978, doi: 10.1063/1.90368.

参考文献

- [49] K. Affolter, W. Lüthy, and M. von Allmen, “Properties of laser-assisted doping in silicon,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 33, no. 2, pp. 185–187, Jul. 1978, doi: 10.1063/1.90302.
- [50] A. Grohe, A. Knorz, J. Nekarda, U. Jäger, N. Mingirulli, and R. Preu, “Novel laser technologies for crystalline silicon solar cell production,” in *Proc SPIE Lasers and Applications in Science and Engineering (SPIE LASE)*, vol. 7202, Art. no. 72020P, Feb. 2009, doi: 10.1117/12.810128.
- [51] M. Vaqueiro-Contreras, B. Hallam, and C. Chan, “Review of laser doping and its applications in silicon solar cells,” *IEEE J. Photovolt.*, vol. 13, no. 3, pp. 373–384, May 2023, doi: 10.1109/jphotov.2023.3244367.
- [52] U. Jäger, A. Wolf, B. Steinhauser, J. Benick, J. Nekarda, and R. Preu, “Laser doping for high-efficiency silicon solar cells,” in *Proc SPIE Solar Energy + Technology*, vol. 8473, Art. no. 847309, Oct. 2012, doi: 10.1117/12.929576.
- [53] G. Kerrien, T. Sarnet, D. Débarre, J. Boulmer, M. Hernandez, C. Laviron, and M.-N. Semeria, “Gas immersion laser doping (GILD) for ultra-shallow junction formation,” *Thin Solid Films*, vol. 453–454, pp. 106–109, Apr. 2004, doi: 10.1016/j.tsf.2003.11.151.
- [54] J. W. Barkby, F. Moro, M. Perego, F. Taglietti, E. Lidorikis, N. Kalfagiannis, D. C. Koutsogeorgis, and M. Fanciulli, “Fabrication of nitrogen-hyperdoped silicon by high-pressure gas immersion excimer laser doping,” *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, Art. no. 19640, Aug. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-69552-8.
- [55] A. Ikeda, K. Nishi, H. Ikenoue, and T. Asano, “Phosphorus doping of 4H SiC by liquid immersion excimer laser irradiation,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 102, no. 5, Art. no. 052104, Feb. 2013, doi: 10.1063/1.4790621.
- [56] W. K. Hamoudi, R. A. Ismail, K. Al-Qayim, D. N. Raouf, R. H. Mahdi, and M. S. Murad, “Effect of rapid thermal annealing on photovoltaic properties of silicon solar cell fabricated by one-step laser doping in liquid,” *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, vol. 130, no. 1, pp. 1–10, Jan. 2024, doi: 10.1007/s00339-023-07173-0.
- [57] A. Pokhmurska, O. Bonchik, S. Kiyak, G. Savitski, and A. Gloskovsky, “Laser doping in Si, InP and GaAs,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 154–155, pp. 712–715, Feb. 2000, doi: 10.1016/s0169-4332(99)00470-5.
- [58] A. Slaoui, P. Prathap, and J. Bartringer, “Laser doping from spin-on sources for selective emitter silicon solar cells,” in *Proc SPIE Solar Energy + Technology*, vol. 8473, Art. no. 84730A, Oct. 2012, doi: 10.1117/12.929205.

参考文献

- [59] Y. W. Wong, X. Q. Yang, P. W. Chan, and K. Y. Tong, “Excimer-laser doping of spin-on dopant in silicon,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 64, no. 3, pp. 259–263, Mar. 1993, doi: 10.1016/0169-4332(93)90032-7.
- [60] Z. Tian, I. A. Salama, N. R. Quick, and A. Kar, “Effects of different laser sources and doping methods used to dope silicon carbide,” *Acta Mater.*, vol. 53, no. 9, pp. 2835–2844, May 2005, doi: 10.1016/j.actamat.2005.02.043.
- [61] S. Mondal and C. S. Solanki, “Deep Diffusion of Phosphorus in Silicon using Microsecond-pulsed Laser Doping,” *Mater. Sci. Semicond. Process.*, vol. 59, pp. 10–17, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.mssp.2016.11.011.
- [62] T. J. Mahaney, A. V. Muravjov, M. V. Dolguikh, T. A. Winningham, R. E. Peale, Z. Tian, S. Bet, A. Kar, and M. Klimov, “Laser doping of germanium,” in *Proc SPIE Lasers and Applications in Science and Engineering (SPIE LASE)*, vol. 5713, pp. 67–73, Apr. 2005, doi: 10.1117/12.585470.
- [63] F. Chiodi, A. D. Chepelianskii, C. Gardès, G. Hallais, D. Bouchier, and D. Débarre, “Laser doping for ohmic contacts in n-type Ge,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 105, no. 24, Art. no. 242101, Dec. 2014, doi: 10.1063/1.4904416.
- [64] I. A. Salama, N. R. Quick, and A. Kar, “Laser doping of silicon carbide substrates,” *J. Electron. Mater.*, vol. 31, no. 3, pp. 200–208, Mar. 2002, doi: 10.1007/s11664-002-0207-3.
- [65] Z. Tian, N. R. Quick, and A. Kar, “Laser-enhanced diffusion of nitrogen and aluminum dopants in silicon carbide,” *Acta Mater.*, vol. 54, no. 16, pp. 4273–4283, Sep. 2006, doi: 10.1016/j.actamat.2006.05.020.
- [66] S. Wu, K. Guo, J. Zhu, J. Bai, and Q. Wang, “Laser assisted solid doping promotes the formation of conductive layer on the surface of single-crystal diamond,” *Surf. Coat. Technol.*, vol. 498, Art. no. 131846, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.surfcoat.2025.131846.
- [67] E. Abubakr, A. Zkria, S. Ohmagari, Y. K. Katamune, H. Ikenoue, and T. Yoshitake, “Laser-Induced Phosphorus-Doped Conductive Layer Formation on Single-Crystal Diamond Surfaces,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 12, no. 51, pp. 57619–57626, Dec. 2020, doi: 10.1021/acsami.0c18435.
- [68] C. S. Smith, “Piezoresistance Effect in Germanium and Silicon,” *Phys. Rev.*, vol. 94, no. 1, pp. 42–49, Apr. 1954, doi: 10.1103/PhysRev.94.42.
- [69] Y. Kanda, “A graphical representation of the piezoresistance coefficients in silicon,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 29, no. 1, pp. 64–70, Jan. 1982, doi: 10.1109/t-ed.1982.20659.

参考文献

- [70] H. Kodera, “Diffusion Coefficients of Impurities in Silicon Melt,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 2, no. 4, pp. 212–219, Apr. 1963, doi: 10.1143/JJAP.2.212.
- [71] L. Nanu and A. G. R. Evans, “Phosphorus diffusion in silicon during rapid thermal annealing,” *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 4, no. 9, pp. 711–714, Sep. 1989, doi: 10.1088/0268-1242/4/9/002.
- [72] S. M. Sze and K. K. Ng, *Physics of semiconductor devices: Sze/physics*, 3rd ed. Chichester, England: Wiley-Blackwell, 2006. doi: 10.1002/0470068329.
- [73] B. Hallam, C. Chan, A. Sugianto, and S. Wenham, “Deep junction laser doping for contacting buried layers in silicon solar cells,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 113, pp. 124–134, Jun. 2013, doi: 10.1016/j.solmat.2013.02.011.
- [74] R. Feldman, S. Jackel, I. Moshe, A. Meir, E. Lebiush, Z. Horowitz, Y. Lumer, and Y. Shimony, “Strengthening of very large crystalline and polycrystalline Nd:YAG rods for high-power laser applications,” *J. Mater. Sci.*, vol. 54, no. 9, pp. 6772–6785, May 2019, doi: 10.1007/s10853-019-03340-y.
- [75] S. Mullick, Y. K. Madhukar, S. Kumar, D. K. Shukla, and A. K. Nath, “Temperature and intensity dependence of Yb-fiber laser light absorption in water,” *Appl. Opt.*, vol. 50, no. 34, pp. 6319–6326, Dec. 2011, doi: 10.1364/AO.50.006319.
- [76] M. A. Green, “Self-consistent optical parameters of intrinsic silicon at 300K including temperature coefficients,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 92, no. 11, pp. 1305–1310, Nov. 2008, doi: 10.1016/j.solmat.2008.06.009.
- [77] D. Bauerle, *Laser Processing and Chemistry*, 4th ed. Berlin, Germany: Springer, 2011. doi: 10.1007/978-3-642-17613-5.
- [78] M. C. Teich and B. E. A. Saleh, *Fundamentals of Photonics*, 2nd ed. Nashville, TN: John Wiley & Sons, 1991. doi: 10.1002/0471213748.
- [79] I. H. Malitson, “Interspecimen Comparison of the Refractive Index of Fused Silica*,†,” *J. Opt. Soc. Am., JOSA*, vol. 55, no. 10, pp. 1205–1209, Oct. 1965, doi: 10.1364/JOSA.55.001205.
- [80] V. Lorient and C. Boccara, “Absorption of low-loss optical materials measured at 1064 nm by a position-modulated collinear photothermal detection technique,” *Appl. Opt.*, vol. 42, no. 4, pp. 649–656, Feb. 2003, doi: 10.1364/ao.42.000649.
- [81] M. R. Dianati, F. Malek Ghaini, and M. J. Torkamany, “Development of melt pool profile in Nd:YAG and fiber pulsed laser spot welding of 316 stainless steel foils,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 36, pp. 4614–4624, May 2025, doi: 10.1016/j.jmrt.2025.04.141.

参考文献

- [82] C. X. Zhao, C. Kwakernaak, Y. Pan, I. M. Richardson, Z. Saldi, S. Kenjeres, and C. R. Kleijn, "The effect of oxygen on transitional Marangoni flow in laser spot welding," *Acta Mater.*, vol. 58, no. 19, pp. 6345–6357, Nov. 2010, doi: 10.1016/j.actamat.2010.07.056.
- [83] M. A. Green and M. J. Keevers, "Optical properties of intrinsic silicon at 300 K," *Prog. Photovolt.*, vol. 3, no. 3, pp. 189–192, Jan. 1995, doi: 10.1002/pip.4670030303.
- [84] G. Masetti, M. Severi, and S. Solmi, "Modeling of carrier mobility against carrier concentration in arsenic-, phosphorus-, and boron-doped silicon," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 30, no. 7, pp. 764–769, Jul. 1983, doi: 10.1109/t-ed.1983.21207.
- [85] P. W. Chapman, O. N. Tufte, J. D. Zook, and D. Long, "Electrical properties of heavily doped silicon," *J. Appl. Phys.*, vol. 34, no. 11, pp. 3291–3295, Nov. 1963, doi: 10.1063/1.1729180.
- [86] E. Niwa and H. Mikami, "Strain sensors and pressure sensors using Cr—N thin films for high - pressure hydrogen gas," *Electron. Commun. Jpn.*, vol. 101, no. 9, pp. 55–62, Sep. 2018, doi: 10.1002/ecj.12111.
- [87] I. H. Kazi, P. M. Wild, T. N. Moore, and M. Sayer, "Characterization of sputtered nichrome (Ni—Cr 80/20 wt.%) films for strain gauge applications," *Thin Solid Films*, vol. 515, no. 4, pp. 2602–2606, Dec. 2006, doi: 10.1016/j.tsf.2005.10.077.
- [88] S. Kohyama, H. Takahashi, S. Yoshida, H. Onoe, K. Hirayama-Shoji, T. Tsukagoshi, T. Takahata, and I. Shimoyama, "Spring constant measurement using a MEMS force and displacement sensor utilizing paralleled piezoresistive cantilevers," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 28, no. 4, Art. no. 045013, Apr. 2018, doi: 10.1088/1361-6439/aaabf7.
- [89] S. Sanati, S. F. Nabavi, and A. Farshidianfar, "Laser wobble welding modeling process: A comprehensive review of fundamentals, methods, heating, and solidification modes," *J. Manuf. Process.*, vol. 131, pp. 1703–1739, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.jmapro.2024.10.001.
- [90] H. Robbins and B. Schwartz, "Chemical etching of silicon : II. The System HF, HNO₃, H₂O, and HC₂H₃O₂," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 107, no. 2, pp. 108–111, 1960, doi: 10.1149/1.2427617.
- [91] C. W. Tang, H. T. Young, and K. M. Li, "Innovative through-silicon-via formation approach for wafer-level packaging applications," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 22, no. 4, Art. no. 045019, Apr. 2012, doi: 10.1088/0960-1317/22/4/045019.
- [92] A. A. Hamzah, N. Abd Aziz, B. Yeop Majlis, J. Yunas, C. F. Dee, and B. Bais, "Optimization of HNA etching parameters to produce high aspect ratio solid silicon microneedles," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 22, no. 9, Art. no. 095017, Sep. 2012, doi: 10.1088/0960-1317/22/9/095017.

参考文献

- [93] B. Schwartz and H. Robbins, “Chemical etching of silicon: IV . Etching technology,” *J. Electrochem. Soc.*, vol. 123, no. 12, pp. 1903–1909, Dec. 1976, doi: 10.1149/1.2132721.
- [94] T. A. Abtew, M. Zhang, and D. A. Drabold, “*Ab initio* estimate of temperature dependence of electrical conductivity in a model amorphous material: Hydrogenated amorphous silicon,” *Phys. Rev. B Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 76, no. 4, Art. no. 045212, Jul. 2007, doi: 10.1103/physrevb.76.045212.
- [95] F. Serra, G. Gaspar, A. Viana, J. Arumugan, I. Costa, D. Pêra, J. Silva, L. Vines, J. Serra, and K. Lobato, “Gas immersion laser doping: n⁺⁺ phosphorus doping on p⁺ Cz-Si wafers with a highly doped p⁺⁺ emitter,” in *AIP Conf. Proc.*, vol. 2826, Art. no. 100003, Jun. 2023, doi: 10.1063/5.0140455.
- [96] C.-H. Kim, S.-H. Jung, J.-H. Jeon, and M.-K. Han, “A simple low-temperature laser-doping employing phosphosilicate glass and borosilicate glass films for the source and drain formation in poly-Si thin film transistors,” *Thin Solid Films*, vol. 397, no. 1–2, pp. 4–7, Oct. 2001, doi: 10.1016/s0040-6090(01)01404-3.
- [97] R. Feldman and J. Sanger, *The text mining handbook: Advanced approaches in analyzing unstructured data*. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2009. doi: 10.1017/cbo9780511546914.

付録

付録 A 使用した装置・薬品の一覧

本研究で使用した装置および薬品の一覧を，以下の Table A.1 から Table A.4 に示す．

Table A.1 センサの構造および組成評価に用いた装置．

Equipment	Model number	Manufacturer
Digital microscope	VHX-6000	Keyence Corp.
Laser confocal microscope	VK-X1000	Keyence Corp.
Stylus profilometer	Dektak XT	Bruker Corp.
SEM	Inspect F50	FEI Co.
TEM	H-9500	Hitachi High-Tech Corp.
TEM	Tecnai Osiris	FEI Co.
FIB	Quanta 3D FEG	FEI Co.
Raman spectrometer	InVia confocal Raman microscope	Renishaw plc
XRD	D8 Discover	Bruker Corp.
D-SIMS	ADEPT-1010	ULVAC-PHI, Inc.

 付録

Table A.2 センサ製作に使用した装置・治具.

Equipment or Jig	Model number	Manufacturer
Laser processing system	FIBER-PROF-001	Profitet Co., Ltd.
Multi-axis stage for chamber	TSD-605S, KSP-606M	SIGMAKOKI Co., Ltd.
Vacuum pump	DAP-6D	ULVAC Inc.
Peristaltic pump	AC-2120	Atto Corp.
Laser displacement sensor	CD22-100V2	OPTEX FA Co., Ltd.
Alignment camera	a2A1920-160ucBAS	Basler AG
L-shaped optical tube	TS-L-1-20-6	CHUO PRECISION INDUSTRIAL Co., Ltd.
Mounting jig for lens tube	C1015/M	Thorlabs Inc.
Optical rail system	OBT-300SH, CAA-60LS, CAA-25LS	SIGMAKOKI Co., Ltd.
Multi-axis stage for alignment camera	TSD-40801SZ, TASB-403, TADC-401C	SIGMAKOKI Co., Ltd.
FFF 3D printer	Ultimaker S5	Ultimaker B. V.
FFF 3D printer	X1 carbon	Bambu Lab
Acrylic processing machine	monoFab SRM-20	Roland DG Corp.
Stirrer	LSH-1D	AS ONE Corp.
Ultrasonic cleaner	VS-100III	AS ONE Corp.
Vacuum evaporation system	VE-2012	Vacuum Device Inc.
Ball bonder	53xxBDA	F&S BONDTEC

付録

Table A.3 センサの電气的特性および機械的的特性評価に用いた装置・治具.

Equipment or Jig	Model number	Manufacturer
Source meter	2612A	Keithley Instruments
Digital multimeter	DT4252	Hioki E. E. Corp.
Temperature-controlled chamber	SH-222	Espec Corp.
Piezo stage	PSVL-400U-S	THK Precision Co., Ltd.
Function generator	WF1947	NF Corp.
Multi-axis stage	TAR-70135	SIGMAKOKI Co., Ltd.
Digital microscope	L-816, L-832	HOZAN Co., Ltd.
Vibration isolation table	DT-5548A-C	SIGMAKOKI Co., Ltd.
Load cell	LVS-1KA (10N), LVS-50GA (500 mN), LVS-50GA (50mN)	KYOWA ELECTRONIC INSTRUMENTS Co., Ltd.
Bridge amplifier circuit for load cells	DPM-913B	KYOWA ELECTRONIC INSTRUMENTS Co., Ltd.
3-channel bridge amplifier circuit for 1-axis sensors	CS1709	Analog Signal Technologies, Co., Ltd.
8-channel bridge amplifier circuit for 3-axis sensor	AS6202	Analog Signal Technologies, Co., Ltd.
Oscilloscope	DL950	Yokogawa Test & Measurement Corp.
Laser Doppler vibrometer	MLD-221D	NEOARK Corp.
Shaker	Exciter Type 4810	Hottinger Brüel & Kjær
Shaker amplifier	Power amplifier Type 2718	Hottinger Brüel & Kjær
Lock-in amplifier	MFLI	Zurich Instruments Ltd.

Table A.4 本研究で使用した薬品, 部品, 素材.

Chemicals, Components or Materials	Manufacturer	Purpose
OCD T-1 P-59230	Tokyo Ohka Kogyo Co., Ltd	Dopant
Hydrofluoric acid (48vol%)	FUJIFILM Wako Pure Chemical Corp.	Si cleaning, Si etching
Nitric acid (70vol%)	FUJIFILM Wako Pure Chemical Corp.	Si etching
Acetic acid (99.7vol%)	FUJIFILM Wako Pure Chemical Corp.	Si etching
Si etchant (SE2020)	Hayashi Pure Chemical Ind., Ltd.	Si etching
Phosphoric acid (85vol%)	FUJIFILM Wako Pure Chemical Corp.	Dopant solution
Epoxy adhesive (Quick 5)	Konishi Co., Ltd.	Sensor chip bonding
Instant adhesive (EX4000)	TOAGOSEI Co., Ltd.	Sensor chip bonding
Pin header (PSL-410256-40)	Hirosugi-Keiki (Dalian) Co., Ltd.	Wiring from the PCB
White LED (NSPW500DS)	NICHIA Corp.	Alignment system ring light
Si wafer (p-type, 2", 300 μm), Si wafer (p-type, 6", 625 μm)	Matsuzaki Seisakusyo Co., Ltd.	Sensor chip material
Au wire (ϕ 0.5 mm, 99.95%)	The Nilaco Corp.	Metal evaporation target
Al wire (ϕ 1.0 mm, 99.99%)	The Nilaco Corp.	Metal evaporation target
W wire (ϕ 0.5 mm, 99.95%)	The Nilaco Corp.	Metal evaporation filament
Ti sheet (t0.1 mm, 99.5%)	The Nilaco Corp.	Shadow mask material

付録 B 使用した PCB の設計

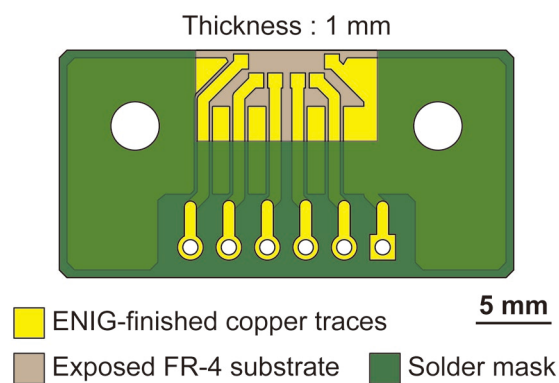


Figure B.1 第 3 章で使用した PCB の設計.

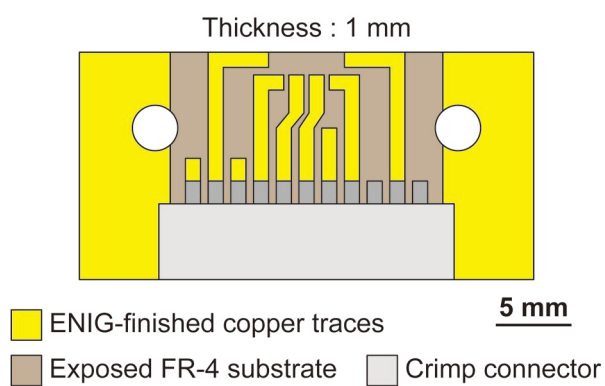


Figure B.2 第4章で使用したPCBの設計.

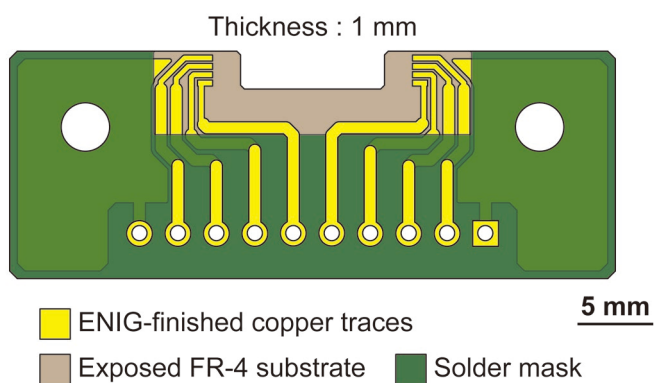


Figure B.3 第 5 章で使用した PCB の設計.

付録

本研究で使用した PCB の設計を Figure B.1 から Figure B.3 に示す。PCB の基板には一般的な材料であるガラス繊維とエポキシ樹脂からなる Flame Retardant Type 4(FR-4)を用いた。また、PCB の配線層にはワイヤボンダの密着性を向上させるための無電解金メッキ(Electroless Nickel Immersion Gold : ENIG)が施されている。第 3 章と第 5 章で用いた基板には、ピンヘッド(PSL-410256-40, Hirose-Keiki (Dalian) Co., Ltd.)を表面にはんだ付けして、ブリッジアンプ回路との接続に用いた。第 4 章で用いた基板には、表面実装用圧着コネクタ(S10B-ZR-SM4A-TF, J.S.T.MFG. Co., Ltd.)が実装されており、ブリッジアンプ回路との接続に用いた。また、ワイヤボンディングの際に失敗した Au 線を取り除くため、PCB 表面にはワイヤボンディングの終端領域以外にも配線層がむき出しとなっている領域が設計されている。また、すべての基板は裏面がベタになっており、表面のベタ領域とビアで接続されている。

付録 C ワイヤボンダの条件

本研究で使用した，ワイヤボンディング始端と終端の押し付け条件を Table C.1 に示す．第 3 章では，PCB からセンサチップへ，それ以外ではセンサチップから基板へボンディングを行った．この時，終端の方が接着力が低いため，超音波出力が高くなっている．続いて，本研究で使用したワイヤボンディングのループ形状を次ページの Table C.2 に示す．センサチップ表面と PCB 表面の距離に応じて，ループの高さが変化している．具体的には，第 3 章はセンサチップ厚が 300 μm ，第 4 章は，センサチップ厚とスペーサー厚の合計が 880 μm ，第 5 章は，センサチップ厚とスペーサー厚の合計が 560 μm である．そのため，第 4 章で用いた条件がループ高さが最大となっている．また，第 4 章で設計したセンサチップはチップ表面のボンディング領域と，基板上のボンディング領域が一番離れているため，ループ距離も長くなっている．

Table C.1 各章で使用したワイヤボンダ始端と終端の接着条件.

	Chapter 3		Chapter 4		Chapter 5	
	First bond	Second bond	First bond	Second bond	First bond	Second bond
Bond position	Substrate	Chip	Chip	Substrate	Chip	Substrate
Search height	46 mm	45.6 mm	45 mm	45 mm	45.4 mm	45.4 mm
Bond force	75 cN	75 cN	75 cN	60 cN	75 cN	80 cN
US power	95 dig	95 dig	95 dig	120 dig	95 dig	150 dig
US time	100 ms	100 ms	100 ms	100 ms	100 ms	100 ms
Td steps	10 μm	10 μm	10 μm	25 μm	10 μm	10 μm

Table C.2 ワイヤボンダのループ形状の条件.

	Chapter 3	Chapter 4	Chapter 5
Loop mode	Rev. triangle	Rev. triangle	Rev. triangle
Loop height	3000 μm	4500 μm	3000 μm
Loop length	1501 μm	2009 μm	1501 μm
Presign	250 μm	250 μm	250 μm
Y-LH pos	231 μm	231 μm	231 μm
Z delay	1017 μm	1623 μm	1017 μm
Reverse height	473 μm	473 μm	473 μm
Reverse length	382 μm	382 μm	382 μm
Tail height	220 μm	220 μm	220 μm

付録 D 表面カンチレバーの機械的特性評価

第 3 章で行ったセンサのばね定数の評価の際、ばね定数に対して固定部の面積が十分確保されていなかったため、ばね定数の低下が観測された。そこで、固定部の面積を $5\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$ から $10\text{ mm} \times 14\text{ mm}$ と十分拡大したセンサチップを製作し、ばね定数および共振周波数の評価を行った(Figure D.1)。この時、センサチップと PCB の接続には瞬間接着剤(EX4000, TOAGOSEI Co., Ltd.)を用いた。

Figure D.2 に、固定部を拡大した第 3 章のセンサに入力した面外方向の変位と計測された力の関係を示す。ばね定数の評価には、3.5.1 節と同様の実験セットアップを用いた。結果より、計測された見かけのばね定数 k_{meas} は 9.15 N/mm となった。この時、実験セットアップのばね定数 k_s は 66.3 N/mm であった。よって、式(3.31)より、カンチレバーそのもののばね定数 k_{sens} は 10.6 N/mm と計測された。FEM シミュレーションから得られたばね定数は 10.8 N/mm であり、

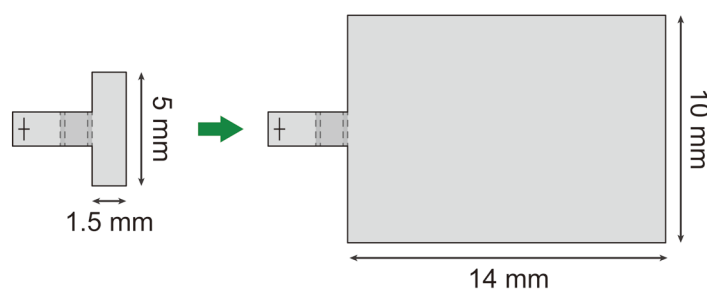


Figure D.1 第 3 章のセンサと固定部を拡大したセンサの設計。

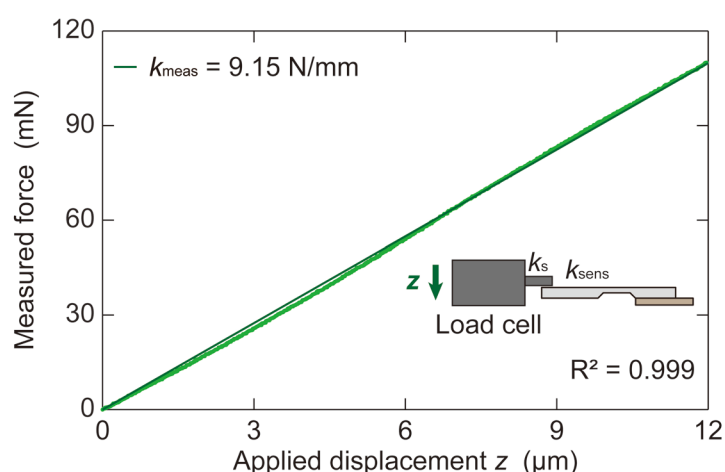


Figure D.2 固定部を拡大した第 3 章のセンサに対して、入力した面外方向の変位と計測された力の関係。

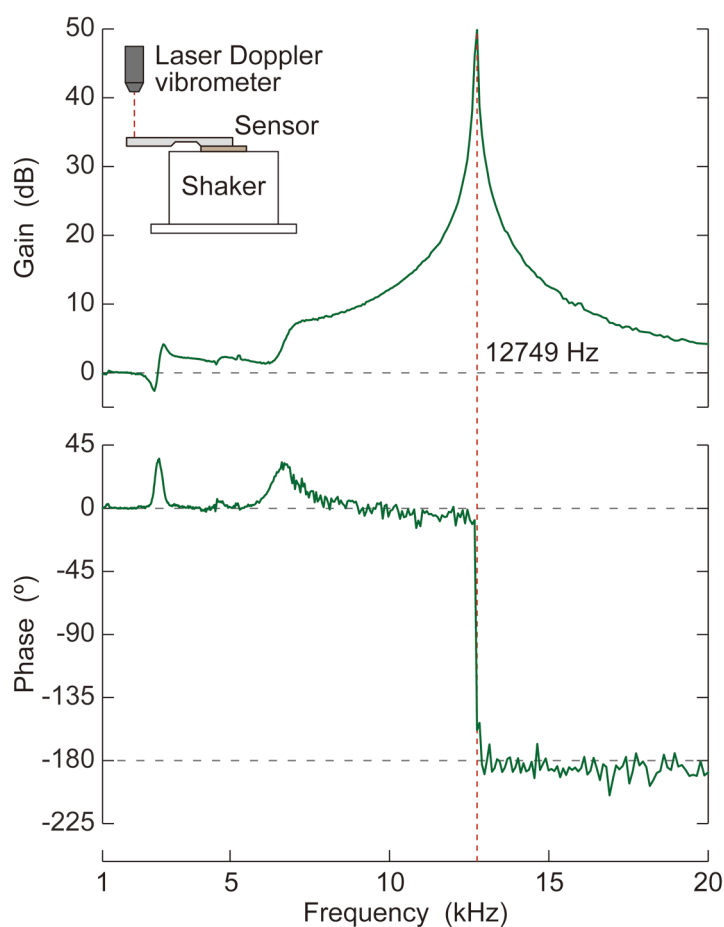


Figure D.3 センサの面外方向の周波数特性.

シミュレーションとの差は約-1.8%であった．以上より，製作したセンサのばね定数とシミュレーション値との間に生じた大幅な差異は，センサチップの PCB への固定方法に起因することが示された．

同様に，周波数特性に関しても評価を行った．3.5.2 節と同様のセットアップを用いて，1 kHz から 20 kHz の周波数範囲において，センサの面外方向の周波数特性を評価した．結果を Figure D.3 に示す．利得が最大となる周波数および位相シフトの位置より，カンチレバーの共振周波数は 12.7 kHz であった．FEM シミュレーションから得られた固有振動数は 12.1 kHz であり，シミュレーションとの差が約 5.2%であった．

以上より，製作されたセンサチップに関して，PCB に対する固定部を十分に大きくし，固定部の弾性変形の影響を抑制することで，シミュレーションと概ね同様な機械的特性が確認された．

付録 E 第 5 章で使用したブリッジアンプ回路のドリフト評価

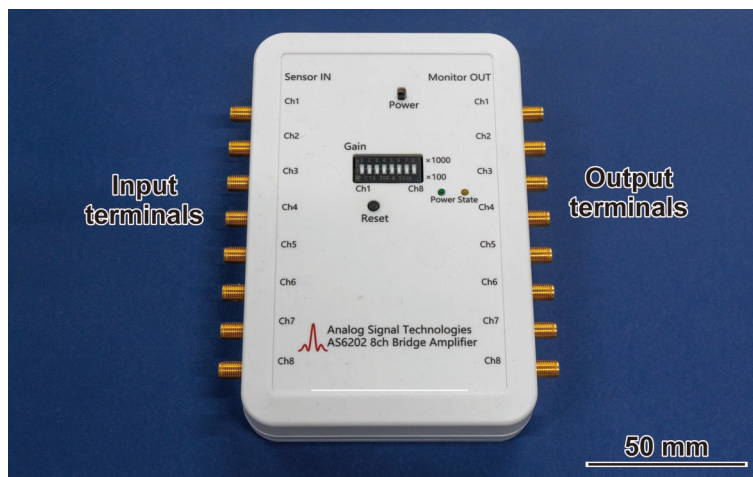


Figure E.1 第 5 章で使用したブリッジアンプ回路の写真.

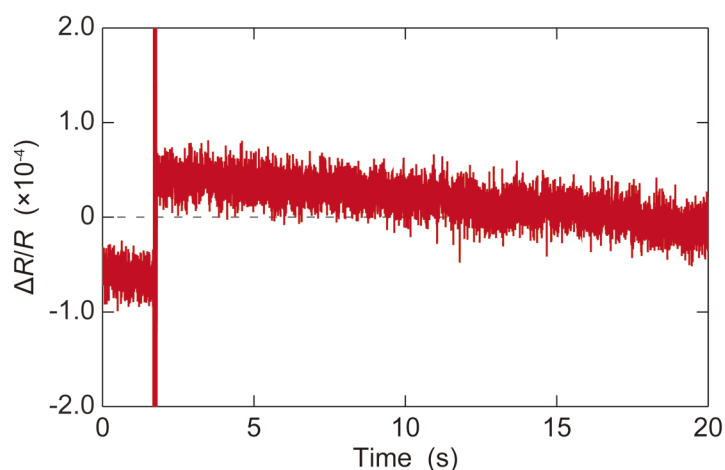


Figure E.2 第 5 章で使用したブリッジアンプ回路のドリフト評価.

第 5 章のセンサ応答特性評価で用いたブリッジアンプ回路(AS6202, Analog Signal Technologies, Co., Ltd.)の写真を図 E.1 に示す. このブリッジアンプ回路に対して, $1.6 \text{ k}\Omega$ の金属皮膜抵抗を取り付けドリフトの評価を行った. 結果を図 E.2 に示す. グラフ中 2 s 付近で 0 点調整を行った後, 5 s から 15 s にかけてのドリフト量を評価した. この時, 抵抗変化率のドリフト量は 1 s あたり -3.0×10^{-6} 程度であり電圧変化に変換すると, 約 $-7.5 \times 10^{-2} \text{ mV}$ となった. 以上より, ブリッジアンプ回路そのものにも若干の負のドリフトがあることが確認された.