

論文の内容の要旨

論文題目 小型高感度な力検出ピエゾ抵抗型カンチレバー

氏 名 宇佐美 貴徳

第1章 序論

本研究の目的は、従来研究よりも小型かつ、高感度に力の検出が可能なピエゾ抵抗型カンチレバーを実現することである。研究対象とするピエゾ抵抗型カンチレバーを図 1 に示す。主としてカンチレバー頭部で力 F や圧力 P を受け、脚(図 1 の Leg と示した箇所)に歪 ε が生じる。この歪 ε に比例して抵抗値 R が変化し、歪 ε が生じる前後の抵抗値を R 及び $R + \Delta R$ とすると、加えられる力ごとに抵抗変化率 $\Delta R/R [-]$ が得られる。1 N あたりの抵抗変化率 $\Delta R/R/F [\text{N}^{-1}]$ を力に対する感度とし、式(1)のように、 $\Delta R/R/F [\text{N}^{-1}]$ は 1 N あたりの歪 ε/F に比例し、これは脚長 l に比例し、脚幅 w と厚さ t の二乗に反比例する。また 1 Pa あたりの抵抗変化率 $\Delta R/R/P [\text{Pa}^{-1}]$ を圧力に対する感度とし、式(2)のように、 $\Delta R/R/P [\text{Pa}^{-1}]$ は 1 Pa あたりの歪 ε/P に比例し、これは脚長 l と頭部面積 A に比例し、脚幅 w と厚さ t の二乗に反比例する。式(1)右辺と式(2)右辺を Scale factor と称する。小型化しても力に対し高感度な設計を Scale factor から検討する。なお本研究では、実験の再現性を理由として加える力は圧力 P とするが、頭部長/2 を l' とした場合に、 $l + l'$ のカンチレバー頭部中心に力 F が加わったと仮定して、 $\Delta R/R/F$ 及び $\Delta R/R/P$ と Scale factor との関係を研究する。

$$\frac{\Delta R/R}{F} \propto \frac{\varepsilon}{F} \propto \frac{(l+l')}{w \cdot t^2} \quad (1)$$

$$\frac{\Delta R/R}{P} \propto \frac{\varepsilon}{P} \propto \frac{A \cdot (l+l')}{w \cdot t^2} \quad (2)$$

ピエゾ抵抗型カンチレバーを用いて力を検出した報告は多岐にわたり、AFM(Atomic Force Microscopy)や酵素基質間の結合力検出、圧力変化を利用した加速度、角加速度、気圧や差圧、風速のセンシングが挙げられる。カンチレバーを小型化すれば、微小な計測対象や微小空間における力の計測が可能となる。また圧力に対してはカンチレバー周囲からの空気の漏れ量が課題であったが、小型化によりカンチレバーの周りの距離が短くなることで漏れ量の低減が可能となる。カンチレバーを幾何学的に相似に小型化した場合、圧力に対する感度

は変わらないが、カンチレバー形状をパターニングする精度、また厚さ t の縮小に応じて、カンチレバー表面から浅いドーピングによるpiezo抵抗層の形成が課題となる。また力 F に対する感度については小型化により感度は向上するが、これについてもカンチレバー形状のパターニングの精度とドーピングが課題となる。本論では、この技術的な課題に対し、金属蒸着膜を利用した FIB 加工法という提案手法により、理論的に検討をした小型高感度な寸法の設計値に近い実寸で、piezo抵抗型カンチレバーの試作を試みている。

試作したカンチレバーについて、厚さ 72 nm のpiezo抵抗型カンチレバーを熱拡散ドーピングで実現し、スタティックな力に対する動作を確認している。また主として圧力が加わる頭部面積 A が 100~400 μm^2 でありながら、脚幅 w をサブミクロンとした場合の、寸法と感度との関係について研究を行った。このようなスケールにおいて、スタティックな力に対する研究はこれまで十分行われてこなかった。本研究を通して、従来研究されてこなかったスケールも含め、小型高感度な力検出piezo抵抗型カンチレバーを実現するための、再利用可能な知識の提示を目指す。

第2章 理論と設計

小型高感度な設計を理論的に検討した。とくに厚さ $t=72$ nm、100 nm、150 nm、205 nm に対し、それぞれ脚幅 $t=0.5$ μm 、1.0 μm 、1.5 μm のpiezo抵抗型カンチレバーの試作を検討した。各厚さに対し 935 $^{\circ}\text{C}$ 、40 sec の熱拡散で不純物（リン）をドーピングし、従来研究及び SIMS(Secondary Ion Mass Spectrometry)分析の結果から、カンチレバー表面から 32 nm 付近（不純物濃度 3×10^{19} [atoms/cc]程度）までをpiezo抵抗層としての有効深さと仮定した。またカンチレバーに圧力 $P=1$ Pa 及び 20 Pa を加えたときに、脚に歪 ε が生じることをシミュレーションで確認した。

第3章 金属蒸着膜を用いた FIB ナノ加工の提案手法と製作

本研究では小型高感度を実現する寸法の設計値に近い実寸で、piezo抵抗型カンチレバーを試作するための提案手法を示している。具体的には図 4 に示すとおり、まず SOI のデバイス層に Au を真空蒸着したウェハを用意する。このウェハに対し予め加工領域を特定するパターニングを行った上で、FIB(Focused Ion Beam)を用いて目的とする加工領域の FIB 像を取得する（図 4 (1)）。次にこの領域に対し、Au 層を介してデバイス層がカンチレバー形状にエッチングされるよう、FIB 加工を行った（図 4 (2)）。加工後、カンチレバー上部の Au 層を除去し（図 4 (3)）、直下の Handle Si 層及び BOX 層のエッチングを行った（図 4 (4)）。Au 蒸着膜を用いた FIB 観察及び加工を行うことにより、デバイス層に対する不必要な Ga の注入を防ぎ、最終的に圧力に対する抵抗変化率 $\Delta R/R[-]$ が得られることを確認した。Au 蒸着膜を介さない場合には抵抗変化は得られなかった。また Au 層を加工したときの加工幅が 35 nm であったのに対し、カンチレバー上部の Au 層除去後の、デバイス層の加工幅は 20 nm であった。これは FIB のビーム強度はプローブの中心ほど高く、中心から外れるほど正規分布に従い強度が低下するという、FIB の特徴によるものである。すなわち、試料面に対して完全な垂直加工とならない特徴を活かし、加工幅 20 nm を実現した。これにより 5~7 nm の誤差の精度で、寸法の設計値に近い実寸によるカンチレバー形状のパターニングに成功した。カンチレバー形状に加工した後の脚幅と加工幅を図 5 に、最終的に完成させたpiezo抵抗型カンチレバーの SEM 画像を図 6 に示す。

第4章 実験と考察

piezo抵抗型カンチレバーに圧力を加える実験を行った。図 2 の概略図及び図 3 の実験セットアップに示すとおり、カンチレバー上下面に配置したチャンバーを介して、圧力校正器から生じさせた圧力をカンチレバーに加える実験を行った。一例として Table 1 の(o)のカンチレバーに対し、1 Pa の圧力を加えたときの波形を図 7 に、圧力と抵抗変化率 $\Delta R/R[-]$ との関係を図 8 に示す。Scale factor と感度の関係であるが、厚さ t ごとに両者の関係は一直線上に沿う結果が得られた。これに対し、従来研究及び SIMS 分析を行った結果（図 11）、 3×10^{19} [atoms/cc]の不純物濃度に対応するpiezo抵抗層の有効深さを 32 nm とした場合の定数 $t_D=64$ nm を、式(1)右边に $\{1-(t_D/t)\}$ として乗算し、 $\{(l+l')/(wt^2)\} \cdot \{1-(t_D/t)\}$ を Scale factor とした。また式(2)についても $\{A \cdot (l+l')/(wt^2)\} \cdot \{1-(t_D/t)\}$ を Scale factor とし、 $\Delta R/R/P$ との関係を確認した（図 12）。piezo抵抗層の有効深さを 26 nm~35 nm まで 3 nm 刻みで値を振った結果、誤差はあるが 32 nm の条件において、圧力 P と力 F ともにカンチレバーの厚さ t によらず、図中の各点は一直線上に沿う関係としてまとめられた。各点は Table 1 に示した寸法の実測値をこの Scale factor の各パラメータに代入し、 $\Delta R/R/P$ との関係を示した結果である。

試作したピエゾ抵抗型カンチレバーの寸法と感度について、Table 1 (i)の条件において感度 $\Delta R/R/P=5.8 \times 10^{-4} [\text{Pa}^{-1}]$ となり、従来研究よりも全長比 1/5.5 倍、脚幅比 $A=1/40$ 倍、厚さ比 1/2.8 倍と小型化を行った結果に対し、圧力 P に対する感度 $\Delta R/R/P$ は従来感度比で 4.4 倍の向上、力 F に対する感度 $\Delta R/R/F$ は 99.2 倍の向上となった。従来よりも小型高感度な力検出ピエゾ抵抗型カンチレバーが実現できたといえる。

また本研究で試作したカンチレバーの厚さ $t=72 \text{ nm}$, 100 nm , 150 nm , 205 nm において、厚さ t 以外同程度の条件の場合 ($w=0.5 \text{ }\mu\text{m}$, $l=2.5\sim 2.7 \text{ }\mu\text{m}$, $l'=10 \text{ }\mu\text{m}$, $A=400 \text{ }\mu\text{m}^2$ の寸法は共通)、厚さ $t=100 \text{ nm}$ が最も感度が高い結果となった (図 12 の(a), (i), (l), (o)の比較)。厚さ $t=100 \text{ nm}$ の場合、 $2 \times 10^{19} [\text{atoms/cc}]$ 以下の不純物濃度が中立面以下にドーピングされているが、これは感度に対して支配的とは言えないと推察される。厚さ $t=150 \text{ nm}$, 205 nm の場合、中立面以上に $2 \times 10^{19} [\text{atoms/cc}]$ 程度の濃度の不純物が存在するが、材料力学としての強さが、厚さ $t=100 \text{ nm}$ よりも感度を低下させたものと考えられる。厚さ $t=72 \text{ nm}$ の場合、中立面以下 $2\sim 3 \times 10^{19} [\text{atoms/cc}]$ の不純物濃度が感度に対し、負に寄与していたと考えられる。脚幅 $w=0.5 \text{ }\mu\text{m}$, $1.0 \text{ }\mu\text{m}$, $1.5 \text{ }\mu\text{m}$ について、それぞれの厚さ t ごとに感度との関係を調べた結果、感度の実測値は理論値に沿うことを確認した (図 9、図 10)。

第5章 結論

本研究を通して、従来よりも小型かつ高感度に力を検出するピエゾ抵抗型カンチレバーを実現した。カンチレバーを小型化した場合に、寸法の設計値に近い実寸で試作を行う技術的な課題に対し、提案手法として金属蒸着膜を利用したFIB観察及びナノ加工法を示した。最小加工幅20 nmでのカンチレバー形状のパターニングを行い、寸法の設計値に近い実寸でピエゾ抵抗型カンチレバーの試作に成功した。カンチレバーに力を加える実験を行った結果、感度の実測値は理論値に沿っていた。またSIMS分析から確認を行ったピエゾ抵抗層の有効深さと、カンチレバーの厚さについて、感度とScale factorの関係から高感度を実現する条件について考察を行った。製作と実験の再現性、感度の実測値が理論値に沿っていたこと、本研究のスケールにおいて感度はScale factorと比例関係にあったことから、本研究を通して、小型高感度なピエゾ抵抗型カンチレバーを実現するための再利用可能な知識を提示できたものと考えている。