

京都大学	博士（工学）	氏名	余 未
論文題目	Microfabricated Silicon Nano-Electromechanical Resonators with Widely Tunable Resonant Properties for Gas Sensing Application （ガスセンサ応用に向けた広帯域共振特性チューニング可能な微細加工シリコンナノ電気機械共振器）		
（論文内容の要旨） 本論文は半導体微細加工を用いて作製した単結晶シリコンのナノ共振器の広帯域な振動特性チューニング、非線形特性制御とこれをガスセンサに応用した結果をまとめたものであって、6章からなっている。 第1章は序論であり、既存のナノ電気機械共振器の基本構造、駆動・検出原理、作製方法を示したうえで、ナノ電気機械共振器の周波数特性、特にその周波数調整や非線形性の調整方法について解説している。そのうえで、本研究の目的として単結晶シリコン製の極薄ナノ電気機械共振器をトップダウン加工で製作すること、その共振周波数の広帯域にわたる調整機能および非線形性の調整機能を示すこと、さらには共振器をガスセンサに応用するためその感度、検出限界を示すこと、を提示している。 第2章は単結晶シリコンの極薄ナノ電気機械共振器の作製とその評価方法について示している。共振器は厚さ $7.5\ \mu\text{m}$ のデバイス層を有する silicon on insulator (SOI) ウエハを用い、紫外線露光技術と電子線露光技術を組み合わせたリフトオフプロセスでマイクロスケールの電極と幅最小 $10\ \text{nm}$ の両端支持梁形状の共振器の形状を電極として用いる金属膜に形成している。この金属膜をマスクとして、Bosch プロセスを用いたシリコンの深掘ドライエッチング技術でデバイス層を垂直に加工し、振動子の形状を形成した。最後に SOI の埋め込み酸化 (SiO_2) 膜 (厚さ $2.2\ \mu\text{m}$) をフッ化水素ガスとアルコールを用いた気相犠牲層エッチング技術で基板からリリースして共振器とした。作製したナノ共振器は幅 $20\sim 300\ \text{nm}$、厚さ $7.5\ \mu\text{m}$、長さ $100\sim 300\ \mu\text{m}$ であり、振動方向の寸法 (幅) に対する長さの比は最大で 15,000 である。共振器の駆動は共振器と固定電極の間に印加した電圧による静電力により行い、変位は他の固定電極と共振器の間の静電容量の変化から検出した。電流アンプを用いてインピーダンス変換し、デジタルロックインアンプで共振特性を測定し、$200\sim 400\ \text{kHz}$ の範囲の共振周波数での共振を観察した。これらはベルヌーイ・オイラー梁として計算される曲げ振動を行う両端支持梁の共振周波数よりも 10 倍程度高く、共振器の長手方向に加わる張力によって弦の振動となっていることが示唆された。 第3章は作製した極薄ナノ電気機械共振器の共振周波数の広帯域チューニング手法とその測定結果について示している。振動子に与えるバイアス電圧 V_{dc} によって共振周波数は最大 70% 変化し、電圧に対する周波数変化率は $1\ \text{V}$ あたり最高 7% で、効率的でかつ広帯域にわたって周波数調整が可能であった。また、振動子の寸法によって周波数は電圧によって高低周波数両方向に変化することを明らかにした。また、温度依存性についても検討し、温度に対する周波数変化が非常に小さくなるバイアス条件を見出しており、この条件でセンサに応用すると温度特性の小さい優れたセンサを実現できる可能性を示した。			

京都大学	博士（工学）	氏名	余 未
第4章は作製した極薄ナノ電気機械共振器の大振幅振動時に生じる非線形振動特性について測定し、議論している。幅と長さの比が大きい両端支持梁は大振幅変位時に梁の長手方向の張力によって硬化ばね特性を示す。また、駆動電極との間に作用する静電力はギャップの2乗に反比例する引力で、これは変位が大きくなると引力が増大し、ばね定数が減少することを意味し、軟化ばね特性を示す。実験結果として幅の広い（300 nm）共振器では硬化ばね特性、幅の狭い（40 nm）共振器では軟化ばね特性を示す結果が得られており、理論解析と一致することを確認している。また、幅 100 nm の共振器ではバイアス電圧を 31 V としたときに、上記 2 つの影響が相殺されて、左右対称な線形共振特性を得られることを見出している。さらに、振幅を大きくすると軟化ばねの変位の 4 乗以上に比例する高次ばね定数項の影響で小振幅では軟化ばね、大振幅では硬化ばねに遷移するなどの複雑な特性を観察している。これらより、共振器の寸法や動作条件の適切な設計により、大振幅でも線形な振動子を実現可能であることを示した。さらに、硬化ばね特性を示す共振器において高次共振が励振される内部共鳴現象、すなわち共振器の周波数が高次共振周波数に対して整数倍の関係となったときに高次の励振が生じていることを確認した。これは、駆動周波数と検出する信号の周波数を分離することに応用でき、高い S/N（信号対ノイズ比）のセンサに応用可能である。 第5章は作製した極薄ナノ電気機械共振器のガスセンシングへの応用について述べている。この共振器は有効質量が小さく比表面積が大きいため、微量な気体の吸着による質量変化を高感度に検出することが可能であり、高感度なガスセンサへの応用が期待される。本研究では、CO₂ ガスの検出を試みるため、共振器を真空チャンバーに設置し、約 10 Pa の真空中で共振周波数を確認したのちに、100 ml/min.の流量で CO₂ ガスを 2 秒間導入し、共振周波数を確認した。2 秒間のガス導入を繰り返しながら共振周波数の変化を測定した。その結果、CO₂ ガスの導入による周波数変化を確認し、2 秒間の CO₂ ガスの導入で 820 Hz、0.2%の変化を観察した、これは 1.6 pg の質量変化に相当する。また理論解析とシミュレーションにより、共振器設計の最適化による感度の向上について議論している。 第6章は結論であり、本論文で得られた成果を要約し、将来の展望について議論している。			

(論文審査の結果の要旨)

本論文では、ガスセンサなどへの応用が期待されるナノスケールの電気機械共振器（以下、ナノ共振器）の周波数、非線形特性チューニング法の確立を目的として、微小電気機械システム（MEMS）技術のトップダウン加工による単結晶シリコン製のナノ共振器の製作プロセスを確立し、その共振周波数の温度依存性を調査したうえで、バイアス電圧による広帯域にわたる周波数制御法と非線形振動の補償法を提案、実証し、内部共振現象の観察やガスセンサとしての動作の実証を行うとともにその理論、解析、考察についてまとめたものである。得られた主な成果は次のとおりである。

ナノ共振器は Silicon on Insulator (SOI) ウエハの厚み $7.5\ \mu\text{m}$ のデバイス層に、電子ビームリソグラフィと深掘ドライエッチング技術を用いて製作された最小幅 $20\ \text{nm}$ 、長さ $100\sim 300\ \mu\text{m}$ の両端支持梁である。最大 $15,000$ の長さとの幅のアスペクト比によってナノ共振器は弦 (string) 振動モードとなるため、共振器に与えるバイアス電圧による静電引力が引き起こす張力によってその共振周波数を 70% の範囲で広帯域チューニング可能であることを示した。

また、このナノ共振器は大振幅振動において軸方向張力による硬化ばね効果とバイアス電圧で生じる静電引力による軟化ばね効果の重ね合わせで表現される非線形振動を示している。そして環境温度やバイアス電圧で2つの効果を重畳させて、非線形性を自由に制御できることを示した。また、非線形ナノ共振器に見られ、高感度センシングへの応用が期待されるモード間のエネルギー交換による高次振動モードの励振である内部共鳴現象を観察した。

さらに、ナノ共振器の応用として、その比表面積の大きさを利用した吸着型ガスセンサを試作した。ナノ共振器を設置した真空容器に CO_2 ガスを流す前後での共振周波数変化を計測し、ガス流量と周波数変化の関係から、この共振器が pg オーダの質量変化の検出分解能を持つこと示し、高感度なガスセンシングへの応用可能性を明らかにしている。

以上、本論文はナノスケールの電気機械共振器の特性制御法の確立という課題に対して、トップダウン加工で製作した単結晶シリコンナノ共振器を提案し、バイアス電圧による広帯域にわたるチューニング特性と硬化ばねから軟化ばねへの遷移を含む非線形特性の制御を理論と実験から明らかにしたうえで、吸着型ガスセンサへの応用を試み、その感度を確認したものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和6年8月5日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。