

称号及び氏名 博士（工学） 井上 太一

学位授与の日付 2021年3月31日

論文名 「ナノ機械共振器の振動制御に関する研究」

論文審査委員 主査 秋田 成司

副査 内藤 裕義

副査 石原 一

## 論文要旨

微細加工技術の進展により、マイクロスケールで機械構造・センサ・電子回路等を集積したデバイスが作製されるようになった。こうした機械構造はマイクロ電気機械システム(Micro electro mechanical systems; MEMS)と呼ばれる。MEMSは小型化による高速応答・高空間分解能・低消費電力等が特徴であり我々の生活にも深く関わりを持つ。例えばMEMS加速度センサは自動車のエアバック制御やテレビゲーム機のコントローラに使用されている。またスマートフォンのような通信機器において、MEMSによる高周波(Radio frequency; RF)スイッチ・フィルター・発振器に用いられている。このようにMEMSは現代社会を支えるキーデバイスのひとつである。MEMSよりサイズが小さな機械構造としてナノ電気機械システム(Nano electro mechanical system; NEMS)がある。NEMSはナノ領域におけるセンサやデバイスとして、MEMSよりも更なる省スペース・エネルギー化や高感度化、そして高周波数化が期待されている。特にナノ機械共振器は軽量でかつ高い共振周波数を活かした超高感度の各種センサや発振器として応用可能である。それらナノ機械共振器の有望な材料として、グラフェンや二硫化モリブデン(MoS<sub>2</sub>)のような原子膜材料が挙げられる。グラフ

エンのヤング率は 1 TPa 程度で鋼鉄の 200 倍以上の強度を持ち、非常に軽量かつ強固な材料である。MoS<sub>2</sub> はグラフェンと比べるとヤング率は 1/4 程度であるが、バンドギャップを有するため、グラフェンよりも効率的な光による振動制御が可能な高機能な NEMS として期待できる。

ナノ機械共振器の応用拡大へ向け、これまで様々な振動制御が検討されてきており、Q 値や共振周波数等を制御できるようになってきた。これによってセンサ感度の向上や周波数の広域化が実現した。しかしながら、これらの制御は線形振動領域に関するものが主であり、更なる応用拡大へは非線形振動の制御が必須である。非線形振動をうまく制御することで、センサ感度の向上や機械的メモリへの応用が期待できる。更に光学分野では、非線形光学効果を用いた高調波の発生や光パラメトリック発振等の応用が実現している。同様にナノ機械共振器の非線形振動もそのような応用の可能性を秘めている。また、従来のナノ機械共振器は単一の原子膜を用いたものがほとんどであり、共振器としての性能が原子膜の特性に大きく依存している。光キャビティやマイクロ波回路のような補助系と組み合わせることで、単一原子膜の共振器でも制御範囲を大きく拡大させることができるが、技術的に困難である。加えて MoS<sub>2</sub> 機械共振器の場合、レーザによる振動制御は検討されているが、レーザ照射した際に現れる MoS<sub>2</sub> 特有の物理現象と機械共振との相互作用について未解明な部分がある。更なる振動制御の拡大のためにはこの相互作用について明らかにする必要がある。

本研究の目的は、グラフェンや MoS<sub>2</sub> からなるナノ機械共振器について、光定在波を用いた非線形振動の制御、原子膜の積層による周波数の温度依存性の制御、そして原子膜特有の物理現象が振動に与える影響について検討した。これらについて明らかにすることにより、原子膜で構成されたナノ機械共振器の振動制御の拡大を目指した。

第 1 章では、本研究の背景、二次元原子膜材料およびナノ機械共振器の優位性ならびに研究背景について示すと共に研究の目的と概要を示した。

第 2 章では、光定在波を用いたグラフェンナノ機械共振器の非線形振動の制御について検討した。異なる波長のレーザを用いることにより、異なる電界強度分布を持つ光定在波を発生させ、その定在波中でグラフェンを非線形振動させた。ここで定在波からグラフェンへ熱量が誘起されるが、グラフェンの振動により電界極度分布の勾配に応じた周期的な熱量変化が誘起される。これにより、グラフェンの非線形振動に対して異なった周期のフィードバックをかけることが可能となる。運動方程式から得た非線形性の指標を基に測定を行った結果、レーザの波長によって振動の非線形性を制御することに成功した。光熱効果を考慮したダフニング方程式から非線形振動の解析を行うことにより、実効的なばね定数を変調させることで非線形振動の制御ができることが分かった。この数値計算は実験結果の傾向とよく一致しており、理論と実験の両面から非線形振動の発生のメカニズムを明らかにし制御範囲の拡大に成功した。本来非線形性は材料の特性に大きく依存するため、制御することは困難であるが、本手法は実効的なばね定数を変調させることで非線形性を相対的に制御することに成功している。

第 3 章では、グラフェンと MoS<sub>2</sub> を積層させ熱膨張率を変調させることで、ナノ機械共振器の温度変化に対する周波数変化を減少させた。共振周波数の温度変化に対する安定性は高感度な力計測や電子回路におけるベースクロックへの応用を考えた場合、非常に重要な課題である。従来のバルク材料では、分子装飾や欠陥導入による手法が熱膨張制御として検討されていたが、共振器の制御

性や特性の悪化が懸念されていた。また、水晶などでは熱膨張係数の結晶の軸方向依存性を上手く使う事で温度係数を低減している。しかし、これら共振器の更なる小型化を進めるにあたりナノ材料の応用は必須である。このような状況において原子層材料の適応も視野に入ってくるが、バルク材料と較べると体積に比べて表面積が大きいため温度の影響を大きく受ける。しかし、原子層材料では異なる特性をもつ材料を積層し新機能を発現させることが容易に行える。熱膨張率に着目すると熱膨張係数の符号が逆のグラフェン（負の熱膨張係数）と  $\text{MoS}_2$ （正の熱膨張係数）の積層構造が容易に実現可能である。このため、温度変化が生じると熱膨張がキャンセルされ熱応力による周波数の偏移を抑えることが期待できる。本研究ではグラフェンと積層グラフェン/ $\text{MoS}_2$ のナノ機械共振器を作製し、共振周波数の温度依存性について比較した。結果として、積層構造を用いることで温度変化に対して  $1/6$  も周波数変化を抑えることに成功した。積層が熱膨張に与える影響を考慮した振動モデルを作製し、実験結果との比較を行った。その結果、振動モデルは実験結果をよく説明できており、原子膜の積層によって熱膨張率を変調でき、ナノ機械共振器の周波数の温度特性を制御が可能であることが明らかになった。本研究手法は、これらの特性を劣化させることなく熱膨張のみを簡便に変調させることができる新しい手法である。

第4章では、光メモリ機能を備えた光学的に制御可能な NEMS 実現に向け  $\text{MoS}_2$  機械共振器の光制御について、 $\text{MoS}_2$  にトラップされた正孔が振動に与える影響の側面から検討した。 $\text{MoS}_2$  に光を照射した際、基板と  $\text{MoS}_2$  の界面や欠陥、そして残留レジストに正孔がトラップされる現象(永続光電流)が報告されている。この現象を詳細に理解することにより、電界効果トランジスタ (FET) の分野にて  $\text{MoS}_2$  の光応答を向上させることができている。また、このトラップされた正孔をうまく利用することで光メモリのような応用も検討されている。しかしながら機械共振器の分野では、光による振動制御は進んでいるが、このトラップされた電荷が振動に与える影響についてほとんど議論されていない。そこで本章では、架橋構造の  $\text{MoS}_2$  機械共振器を作製し、永続光電流が振動に与える影響について調べた。永続光電流の起源は基板との界面における正孔のトラップが主であるが、先行研究よりも強い強度の光を照射することにより、基板との接触のない架橋させた  $\text{MoS}_2$  においても欠陥やレジストに正孔をトラップさせることに成功し、20分以上永続光電流を観測した。続いてゲート電界により  $\text{MoS}_2$  へ張力を印加した状態での光照射前後における共振周波数シフトの時間依存性について計測した。その結果、レーザ照射後も20分以上共振周波数がダウンシフトしたままであり、光照射後に観られる永続光電流と似た現象が見られた。ここで周波数シフトの要因として光誘起熱効果が考えられるが、光吸収による  $\text{MoS}_2$  の温度上昇は  $0.1 \text{ K}$  程度でかつ熱緩和時間は ns オーダーであるため、この影響は無視できる。これらの事から、共振周波数のダウンシフトはトラップされた残留正電荷によるゲート電界の遮蔽効果が主な原因であると結論付けた。続いて光照射後、電圧パルスによるジュール熱を  $\text{MoS}_2$  に加えたところ、一部永続光電流による周波数のダウンシフトが緩和される現象が確認できた。これはジュール熱によりトラップされた正孔が一部熱放出されたことに起因しており、レーザとジュール熱による永続光電流の制御が可能であることを示した。以上のように外部メモリデバイスを必要としない光メモリ機能を備えたナノ電気機械共振器が  $\text{MoS}_2$  により実現できることが期待できる。

第5章では、本研究で得られた結果をまとめ、結論および今後の展望について述べた。

## 審査結果の要旨

ナノ電気機械システムはナノ領域における新奇量子デバイスや高感度なセンサとして期待されている。本研究は、グラフェンや  $\text{MoS}_2$  からなる原子膜を用いたナノ機械共振器の振動制御とその高機能化を目的とし行われたもので以下の成果を得ている。

- (1) ナノ機械共振器を量子計算機や量子センサへ応用する際に重要となる非線形振動制御について検討した。異なる波長のレーザを用いることにより、異なる電界強度分布を持つ光定在波を発生させ、その定在波中でグラフェンを非線形振動させた。定在波由来の光熱効果による熱膨張を考慮した解析から、光熱効果により実効的なばね定数に変調され非線形振動が制御できたことを理論的にも明らかにしている。
- (2) ナノ共振器では如何に熱擾乱を減少させるかが大きな課題である。この研究では負の熱膨張係数をもつグラフェンと正の熱膨張係数をもつ  $\text{MoS}_2$  を積層し、ナノ機械共振器の熱に対する安定性を向上を目的とし行われた。積層が熱膨張に与える影響を考慮した振動モデルによる解析から、原子膜の積層によって熱膨張率に変調できナノ機械共振器の周波数の温度特性の制御が可能であることを明らかにした。その結果、積層構造を用いることで温度変化に対する周波数変化を抑圧することに成功している。
- (3) ナノ機械共振器ネットワークによる計算機を実現するには重要となる不揮発メモリ機能を備えたナノ電気機械デバイスを  $\text{MoS}_2$  原子膜で実現することを目的とした。検討の結果、 $\text{MoS}_2$  機械共振器へレーザ光照射した後、暗中でも20分以上共振周波数のダウンシフトが継続するという永続光電流現象と類似のメモリ効果を発見した。さらに光照射後、電圧パルスによるジュール熱を  $\text{MoS}_2$  に印加し周波数のダウンシフトの緩和が可能であることを見出している。このように不揮発性メモリ機能を備えたナノ電気機械共振器を  $\text{MoS}_2$  により実現している。

以上の諸成果は、原子層膜ナノ電気機械デバイスに関する技術に関し重要な知見を与えるとともに、これらを用いた超高感度計測や量子計算へ向けた有益な情報を提供する独創的な研究であり、電子物理工学分野に貢献するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。