

審査の結果の要旨

氏名 野中 啓一郎

MEMS やさらに小さい寸法で構成される NEMS に代表される微小電気機械システムにおいて、メカニカル構造の機械的特性を利用したデバイスの開発が進められている。これらデバイスには、メカニカル構造の振動特性を利用した応用例が極めて多い。これらの機械設計においては、密度、ヤング率、破壊強度などの材料特性に加えて、デバイスが呈する機械的振動特性である振動振幅、共振周波数、Q値の評価が極めて重要である。しかしながら、作製手法に由来して材料特性や材料内構造特性がバルク材料のそれらとは異なること、メカニカル構造の極小寸法故に機械的振動特性の検出が困難であること、が課題となっている。

本研究は、上記課題を解決すべく、マイクロ・ナノメカニカル構造の機械的特性評価を念頭に、走査電子顕微鏡の原理と熱励起機械振動の原理とを融合した振動測定技術、振動特性にもとづく機械的性質の評価手法を提案し、実装している。そして、マイクロ・ナノメカニカル構造の一例として FIB-CVD で作製したカーボンナノピラーを取り上げ、提案した評価手法の妥当性を示すとともに、カーボンナノピラーの機械的性質について考察を加えている。

まず、熱励起機械振動している測定対象の二次電子像のグレイ値プロファイルを、振動していない場合のグレイ値プロファイルと熱励起機械振動の平均確率振幅に由来するグレイ値プロファイルとのたたみこみ積分によりモデル化している。本研究では、特に、電子顕微鏡の像形成原理にもとづいたモデル化をおこない、構造体の大きさを反映したグレイ値プロファイルを使用することによって、振幅評価の高精度化を図っている。

次に、FIB-CVD で作製されたカーボンナノピラーを取り上げ、提案した評価手法の妥当性を検証している。作製したカーボンナノピラーの成長高さは 1.6-34.5 μm であり、根元における直径は成長高さによらず 110 nm 程度である。提案した評価手法によって、熱励起機械振動によるカーボンナノピラーの振幅はサブ nm から数 nm であり、共振周波数は数百 kHz から数 MHz であることを明らかにしている。すなわち、使用した走査電子顕微鏡の分解能 0.6 nm において、サブ nm の振幅と数 MHz の共振周波数を測定できることを示している。測定した振幅と共振周波数からヤング率と密度を推定した結果、ヤング率は 51

から 78 GPa であり、密度は 2500 から 3500 kg/m³であった。これらの値は、従来の研究においてカーボンナノピラーに対する引張試験や曲げ試験などで評価されたヤング率や密度とほぼ同等であることから、熱励起機械振動特性にもとづく機械的特性評価手法とグレイ値プロファイルによる振幅評価手法の妥当性を示すことができている。

最後に、FIB-CVD で作製したカーボンナノピラーの内部構造をモデル化し、提案・実装した計測手法を適用して内部構造の計測・評価を行い、成長機構を考慮したコア・シェルモデルを構築し、コアとシェルそれぞれの密度とヤング率を定量的に評価している。本研究では、レイリー・リッツ法を適用することにより、不均質非一様梁の振動解析をおこなっている。以上の解析により、カーボンナノピラーに含まれるカーボンのヤング率と密度の定量化を可能とした。このような複合材料においても、振動特性にもとづく機械的特性評価手法は有効であり、内部構造に由来するモデル化と組み合わせることにより、ナノメカニカル構造の機械的特性を解明するツールとしての展開を示唆している。

提案された機械的特性評価手法は、一般的なナノ計測ツールである走査電子顕微鏡を利用しているため測定対象に加振装置やセンシングデバイスや膜付けなどが不要であり、しかも、共振周波数、Q値、振幅、ヤング率、密度の同時計測を可能としているところに特徴がある。走査電子顕微鏡を用いる最大の利点は、定量的な振幅測定と共振曲線の測定だけでなく、構造の観察、形状の測定、容易なアライメントなど、構造体の機械的特性評価に要求される操作が一つの装置で実現できることである。また、その応用としてこの簡便な方法によってでもカーボンナノピラーの内部構造の同定と密度及びヤング率の定量的評価が可能であることを示した点も新しい。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。