

ナノメカニカル構造の創製とデバイス応用に関する研究

Creation and Characterization of Nanomechanical Structures
and its Applications to Devices

石原 直 (ISHIHARA SUNAO)

東京大学・大学院工学系研究科・教授



研究の概要：

本研究は、ナノスケールの寸法を持ったメカニカル構造の機械的な振舞いを研究対象とする。機械構造の微細化により発現する高い共振周波数やQ値などの新奇な機械的特性を利用して従来にはない革新的機能や性能を実現することを狙い、3次元ナノ振動子の作製、ナノスケール振動計測、機械共振特性制御などの基盤技術を構築し、これらを駆使したナノメカニカル構造の創製により、革新的性能を有するNEMSセンシングデバイスの実現を目指す。

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：ナノメカニクス、ナノ・マイクロ加工、NEMS

1. 研究開始当初の背景

あらゆる産業を支えるデバイスや材料は、その構成要素・構造の微細化（今や要素寸法は数～数十ナノメートルに到達）により機能を高度化し性能を高めてきた。21世紀に入り、極微細な構造のナノ物性を利用して革新的なデバイスの開発を目指すナノテク研究が多く分野で活発に行われている。この背景のもと、ナノ寸法の機械構造が発現するメカニカルナノ物性を利用して極微量検知を行う極限センシングの研究を微小機械分野に展開し、ナノ振動子を用いて革新的性能を持ったセンシングデバイスの実現を目指す工学研究が活発化している。

マイクロ電気機械であるMEMSの極微細化の観点から、ナノ寸法を持つ微小機械をNEMS (Nanoelectromechanical Systems)、あるいは両者を総合してMEMS/NEMSと呼ぶ。また、ナノ機械物性の解明と応用に関する研究を担う機械工学を「ナノメカニクス」と呼ぶこととする。

2. 研究の目的

本研究は、微小な3次元ナノメカニカル構造がナノ寸法ゆえに発現する極めて高い共振周波数やQ値 (quality factor) といった新しい機械特性を探索・解明し、それらを機能化、システム化することによって革新的な機能と性能を持ったNEMSセンシングシステム (図1) を創製することを目的とする。

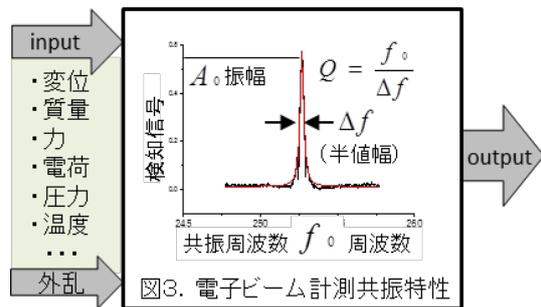


図1. NEMSセンシングシステム

3. 研究の方法

半導体やカーボン材料を用いてナノ振動子を設計・作製し、共振特性を解明・機能化することによって革新的デバイスを創製する。具体的には、(1)電子ビーム/イオンビーム応用加工技術の複合化による3次元ナノ構造作製技術の開発、(2)ナノ振動子の共振特性 (共振周波数、共振振幅、Q値) の測定を行うナノ振動計測技術の確立、(3)3次元ナノ構造の表面物性や内部構造が共振特性に及ぼす影響の評価、(4)ナノ振動子構造への引張歪印加や外力加振などによる共振特性制御法の開発、(5)グラフェンやCNTなどの優れた機械物性を持つ素材のナノ振動子への応用検討などナノメカニクス創製基盤技術を構築し、これらを駆使して、(6)常温・大気中で極微小物理量を検出できるセンシングデバイスへの応用を進める。

4. これまでの成果

基盤要素技術の研究として、(1)ビーム応用加工技術の高度化、(2)ナノ振動子の共振特性の測定手法の開発、(3)ナノ振動子の共振特性制御手法の開発、(4)表面改質等によるナノ振動子の物性制御について述べ、デバイス応用として(5)微小変位測定デバイス試作について報告する。

(1) ビーム応用加工技術の高度化

電子ビームとイオンビームのレジスト中への侵入深さの違いを利用した EB/FIB 複合リソグラフィ技術について、技術の高度化と加工限界の把握を行い、幅 15 nm、厚さ 10 nm までの微細な多層 3 次元ナノ構造を極めて簡便なプロセスで作製出来ることを示した (図 2)。対象材料としても、シリコン系 (HSQ) のみならずカーボン系 (PMMA) への適用可能性を示した。

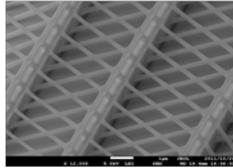


図2. EB/FIB複合リソによる2層ナノメッシュ構造

(2) 電子ビームによるナノ振動測定法

これまで開発してきた電子ビームによる振動測定技術の高精度化を狙い、試料からの 2 次電子放出角度依存性を利用した新たな手法を考案した。検出原理に角度依存性を利用することにより 2 次電子の検出における背景信号レベルを大幅に低減できるため、2 次電子強度を検知する従来法に比べて極めて高精度に共振周波数特性を測定できることを検証した (図 1 中の図 3)。

(3) ナノ振動子の振動特性制御

ナノ振動子への歪印加による共振特性 (共振周波数、Q 値) の特性改善技術に加えて、外部加振力を利用した共振特性制御法を開発した。FIB-CVD 法により DLC ナノ振動子を作製し、対抗電極より静電吸引力を振動復元力として作用させることにより (図 4)、700% 以上という極めて大きな制御範囲の共振周波数制御を可能とした。

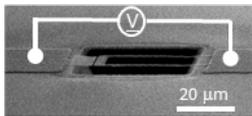


図4. DLCアクティブ振動子

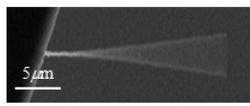


図5. フッ素コート振動子

(4) 表面改質による共振特性の改善

ナノ振動子の表面状態が共振特性に及ぼす影響について調べ、振動子の表面自由エネルギー、すなわち親水性/疎水性の特性が共振特性への主要な影響要因であることを解明した。この結果を基に、表面にフッ素コーティングを施すことにより、振動子の機械共振における Q 値の大幅な向上が可能であることを実証した (図 5)。

(5) デバイス応用への展開

ナノ振動子による極微小物理量センシ

ングデバイスとして、両持ち梁振動子を用いた微小変位測定デバイスを試作した (図 6)。ピエゾ

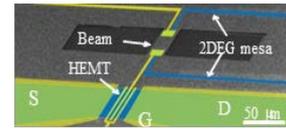


図6. 微小変位測定デバイス

抵抗効果を持つ化合物半導体 (GaAs) の両持ち梁振動子と HEMT (高電子移動度トランジスタ) をオンチップで結合し、常温大気中での振幅測定により、0.3 nm の変位検出を達成した。測定系のノイズ評価によると本デバイスの変位感度は 9 pm となる。

なお、本研究課題では上記の他に、グラフェンの振動子への適用、光とナノ振動子の相互作用の研究、ナノ振動子のパラメトリック励振の研究などを進めている。

5. 今後の計画

重点的に推進してきた NEMS 構築のための基盤要素技術が整いつつある。今後は引き続き基盤技術の高度化を進めるとともに、センシングデバイス応用に重点的に取り組む。

6. これまでの発表論文 (主要論文)

- 1) R. Kometani, S. Nishi, S. Warisawa, S. Ishihara, Dynamic characteristics control of DLC nano-resonator fabricated by focused-ion-beam chemical vapor deposition, *J. Vac. Sci. Technol. B* **29**, 06FE03-1-4 (2011)
- 2) R. Kometani, T. Hatakeyama, K. Kuroda, S. Warisawa, and S. Ishihara, Carbon nanomechanical resonator fabrication from PMMA by FIB/electron-beam dual-beam lithography, *J. Vac. Sci. Technol. B* **29**, 06FE06-1-5 (2011)
- 3) Y. Oda, K. Onomitsu, R. Kometani, S. Warisawa, S. Ishihara, and H. Yamaguchi, Electromechanical Displacement Detection With an On-chip High Electron Mobility Transistor Amplifier, *Jpn. J. Appl. Phys.* **50**, 06GJ01-1-3 (2011)
- 4) H. Shimizu, J.-J. Delaunay, R. Kometani, S. Warisawa, S. Ishihara, Evaluation of Resonance Characteristics Change of Silicon Resonators Due to Surface Treatment, *Jpn. J. Appl. Phys.* **49**, 06GN13-1-4 (2010)
- 5) R. Kometani, S. Warisawa, S. Ishihara, Piezoresistive effect in the three dimensional diamondlike carbon nanostructure fabricated by focused-ion-beam chemical vapor deposition", *J. Vac. Sci. Technol. B*, **28**, C6F38-41 (2010)

ホームページ等

<http://www.nanome.t.u-tokyo.ac.jp/jp/>