

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 3月31日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（S）

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22226004

研究課題名（和文）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

研究課題名（英文）Creation and Characterization of Nanomechanical Structures and its Applications to Devices

研究代表者

石原 直（ISHIHARA SUNAO）

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：00422329

研究成果の概要（和文）：ナノスケールの寸法を持ったナノメカニカル構造は、そのナノ寸法ゆえに発現する新しい機械特性を利用して従来にない革新的機能・性能をもった新しいデバイスや機械を実現できる可能性を有する。本研究では、ナノメカニカル構造としてナノ振動子を取り上げ、まず、電子ビームやイオンビームを用いた3次元ナノ構造の創製技術、および電子ビームやAFMを用いたナノ構造の微小振動測定技術の研究開発を進めた。そして、これらの開発技術を駆使して作製したナノ振動子の共振特性解明と、それらのセンシングデバイスへの応用に関する研究を推進した。

研究成果の概要（英文）：Nanomechanical structures have great potential in realizing innovative electromechanical systems utilizing new properties and functions appeared due to its small scales. In this research, fundamental investigations into fabrication using electron and ion beams, measurement using electron beam and AFM, and characterization in frequency domain of nanomechanical structures, and their applications to innovative nanoelectromechanical systems (NEMS) i.e. ultra-small resonator-based sensing devices with high detection performances are conducted.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	82,000,000	24,600,000	106,600,000
2011年度	69,000,000	20,700,000	89,700,000
2012年度	7,300,000	2,190,000	9,490,000
総計	158,300,000	47,490,000	205,790,000

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・マイクロ加工、NEMS、ナノメカニクス、ナノ計測、ナノ振動子

1. 研究開始当初の背景

あらゆる産業を支えるデバイス・材料は、それを構成する要素・構造の微細化により機能を高度化し性能を高めてきた。今やその構造寸法は数～数十ナノメートル領域に突入し、ナノ構造が発現する新たな物性を各種デバイスに応用するナノテクノロジー研究が多様な分野で活発化している。この背景のもと、まず、ナノサイエンス分野において、ナノ寸法を持った機械構造が発現するメカニカルなナノ物性を極微小な物理量の検知に利用する極限センシングの研究が報告されるようになった。本研究は、極低温・超高真空中で行われてきたナノ振動子極限センシングを、常温・大気中において機能する革新的センシングデバイスの実現を目指す工学研究に展開しようと着想したものである。

一般に、マイクロ電気機械であるMEMSのさらなる微細化の観点から、ナノ寸法を持つ微小機械をNEMS (Nanoelectromechanical Systems) と呼ぶ。また、この両者を総合してMEMS/NE MSと呼ぶことも多い。本研究では、ここで提案するナノメカニカル構造の機械物性の解明とデバイス応用を担う機械工学を「ナノメカニクス」と呼び、具体的には極微細化した3次元ナノ構造の代表であるナノ振動子をキー要素とするNEMSによって高機能デバイス・システムを創製する研究を推進したものである。

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)、さらには非線形共振特性といった新しいナノ機械特性を探索・解明し、それらを機能化、デバイス化、システム化することによって、図1に示すような革新的な機能と性能を持ったNEMSセンシングデバイス・システムを創製することを目的とする。

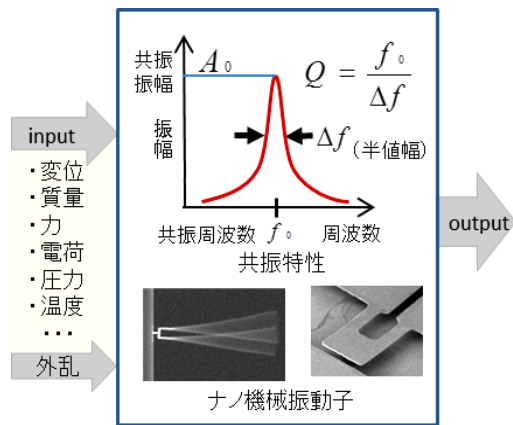


図1. NEMSセンシングデバイス

3. 研究の方法

本研究ではセンシングデバイス応用ナノメカニクスとして、半導体(Si, GaAs)やカーボン素材(DLC, CNT, グラフェン)を用いて、ビーム(両持ち梁), カンチレバー(片持ち梁), メンブレン(薄膜)などの振動子構造を対象に、超高周波共振・高Q値のナノ振動子の創製に挑戦する。具体的な研究の進め方は次のとおりである。

- (1) 3次元ナノ構造の作製技術、機械特性(共振特性)の計測・評価技術を創出・高度化し、基盤技術として確立する。
- (2) ナノ振動子の共振特性支配要因(構造・形状・寸法・材料・表面処理・周囲環境)に関する実験的・理論的な検討から、ナノスケール機械特性の解明を進める。
- (3) これらの技術と知見を基に、優れた共振特性(共振周波数, Q値)を持つナノ振動子による微小物理量センシングデバイスの試作・性能評価をとおして、NEMSセンシングデバイスの設計指針を提案する。

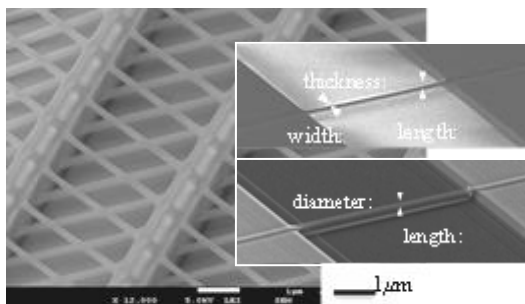
4. 研究成果

基盤要素技術の研究として、(1)ナノ振動子創製のための3次元ナノ構造作製技術、(2)ナノ構造共振特性の測定・評価法、(3)ナノ振動子共振特性の制御手法、および、(4)グラフェ

ン振動子の振動性能向上に関する代表的な研究成果を報告する。また、これらの開発技術を駆使して進めた(5)NEMSセンシングデバイス応用の研究について報告する。

(1) ビーム応用加工技術の研究開発

3次元ナノメカニカル構造創製の基盤技術としてFIB/EB 複合リソグラフィ技術を開発した。ビーム応用リソグラフィにおける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大きな違いを利用して、3次元構造の同時形成を行う。例えば両持ち梁ナノ振動子の作製では、土台の部分を電子ビームで露光、梁となる表層をイオンビームで露光し、一括現像により両持ち梁構造を簡単に形成することができる。



(a) 2段重ねメッシュ構造 (b) カーボンナノ振動子

図2. EB/FIB複合リソグラフィにより作製した3次元ナノメカニカル構造

図2(a)は2段重ねメッシュ構造を形成した例で、解像力として、幅15nm、厚さ10nm という微細な梁構造を作製できることを示している。また、図2(b)はPMMAを用いて梁構造を形成した後アニーリングを施すことで作製したカーボンナノ振動子である。本手法によれば、リソグラフィとアニーリングのプロセスにより、カーボン系レジスト(PMMA)からカーボンナノ振動子、シリコン系レジスト(HSQ)から SiO₂ ナノ振動子を簡便に作製することができる。この様に FIB/EB 複合リソグラフィ技術は、3次元ナノ構造の創製に有力なナノ加工技術を提供するものである。

(2) 電子ビームによるナノ振動測定法の開発

ナノ構造の振動測定については、測定対象の外形寸法が小さいことや光の回折限界から、通常多用されるレーザー光を用いる光計測の適用が難しい場合が多い。このため本研究では、AFM(Atomic Force Microscope)や電子ビーム(EB:Electron Beam)を用いるナノ振動測定法を検討してきた。

電子ビーム振動測定法の原理を図3に示す。SEM(Scanning Electron Microscope)内に置いた振動体に固定電子ビームを照射すると、振動体からの2次電子信号は振動によって変調され、検知信号の周波数解析により振動サンプルの周波数特性が得られる。

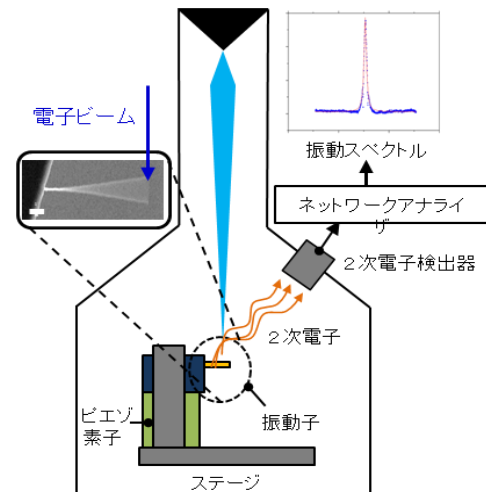


図3. 電子ビーム振動計測法模式図

ここでは、振動サンプルからの2次電子強度そのものの検出に代えて、電子ビームを振動に対して斜めに入射したときの2次電子の放出角度依存性を利用する新手法を開発した。従来の強度検出法の弱点であった振動振幅の測定が可能となるとともに、光ヘテロダイン測定をリファレンスとして評価した測定性能は、共振周波数、振動振幅、Q値の何れの測定についても誤差±0.3%以下という良好な結果を得ている。今後、ナノ構造振動特性の汎用的計測法として有力な手法と考えられる。

(3) ナノ振動子の振動特性制御

センシングデバイスの高機能設計にとって、ナノ振動子の共振特性制御は重要な課題である。これまでも、ナノ振動子への歪印加、振動子表面改質など様々な特性制御手法が開発されているが、ここでは、外部加振力による共振周波数の調整・制御技術を開発した。図4にアクティブ振動子として示すように、対向電極より振動子に静電吸引力の振動復元力を作用させることにより、7倍を超える広い範囲の共振周波数制御を実現している。本手法はナノ振動子の共振周波数の設計・調整・高性能化、周波数チューニングなどに有効な手段を提供する制御技術として有力である。

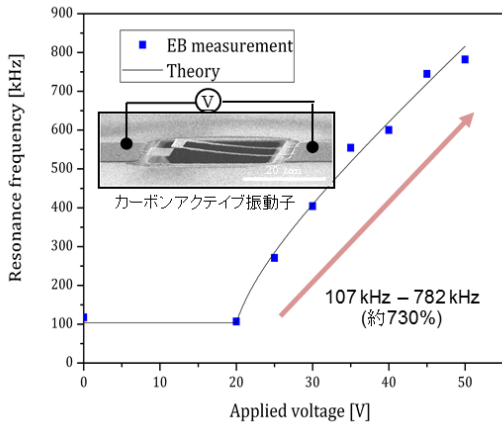


図4. 静電復元力を利用したメカニカル振動子の広帯域共振周波数制御

(4) グラフェン振動子の作製と共振性能向上

グラフェンはその超薄膜構造や高い機械剛性からナノ振動子用材料として有望である。ここでは、サイズ効果や表面効果からQ値が極めて低いとされるグラフェン振動子について、新しい作製プロセスの適用によるQ値の向上を試みた。

図5に示すようにSU-8レジスト上にグラフェンを架橋させ、DLC堆積による支持部固定とアニーリング(SU-8の収縮)による引張り応力印加により、7,000超というグラフェンとしては極めて高いQ値を達成した。ここで開発したナノ振動子作製プロセスは、グラフェン振動子においても高いQ値を確保する有効な手段を示唆している。

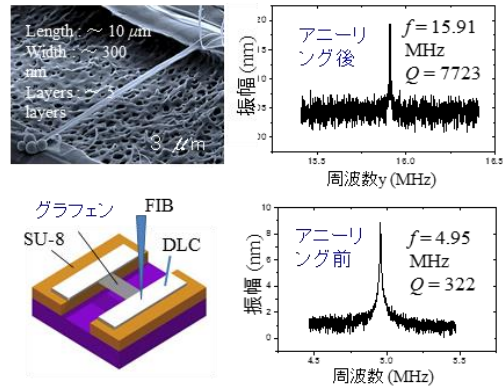


図5. 新しい作製プロセスによるグラフェン振動子のQ値向上

(5) センシングデバイス応用への展開

ナノ振動子の極微小な物理量のセンシングへの応用を狙いに、微小変位、微小電荷、光放射圧などの検知デバイスの試作検討を進めた。

図6はナノ・マイクロ振動子を用いた微小変位検知デバイスである。ピエゾ抵抗効果を持つ化合物半導体(GaAs)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、微小振動によって励起される微小電位を増幅して検知信号を得る。本デバイスにより、室温において0.3nmという微小変位検出を達成した。この変位検出感度を系のノイズから評価すると、本デバイスは9pmという超高感度を実現できる潜在力を持ち、最適化により更なる超高感度を実現できる可能性を有している。

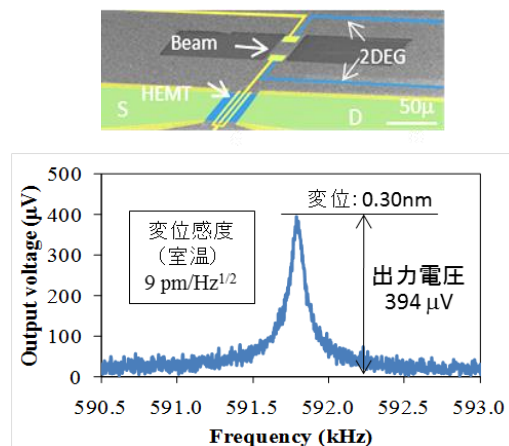


図6. 両持ち梁振動子と高移動度トランジスタを組み合わせた微小振幅測定デバイス

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 22 件、内査読あり 20 件)

- 1) Y. Oshidari, T. Hatakeyama, R. Kometani, S. Warisawa, S. Ishihara, High Quality Factor Graphene Resonator Fabrication Using Resist Shrinkage-Induced Strain, *Appl. Phys. Express* **5**, (2012) 117201, 10.1143/APEX.5.117201
 - 2) H. Ashiba, R. Kometani, S. Warisawa, S. Ishihara, Nanomechanical tuning forks fabricated using focused-ion-beam chemical vapor deposition, *J. Vac. Sci. Technol. B* **30**, (2012) 06FD03, 10.1116/1.4766315
 - 3) S. Warisawa, K. Kuroda, S. Chen, R. Kometani, S. Ishihara, A Nanomechanical Resonator from HSQ Fabricated by FIB/EB Dual Beam Lithography, *J. Photopolym. Sci. Technol.* **25**, (2012) 37, 10.2494/photopolymer.25.37
 - 4) D. Guo, R. Kometani, S. Warisawa, and S. Ishihara, Three-Dimensional Nanostructure Fabrication by Controlling Downward Growth on Focused-Ion-Beam Chemical Vapor Deposition, *Jpn. J. Appl. Phys.* **51**, (2012) 065001, 10.1143/JJAP.51.065001
 - 5) H. Yamaguchi, H. Okamoto, S. Ishihara and Y. Hirayama, Motion detection of a micro-mechanical cantilever through magneto-piezovoltage in two-dimensional electron systems, *Appl. Phys. Lett.*, **100**, (2012) 012106, 10.1063/1.3674288
 - 6) H. Ashiba, R. Kometani, S. Warisawa, and S. Ishihara, Quality factor enhancement on nanomechanical resonators utilizing stiction phenomena, *J. Vac. Sci. Technol. B* **29**, (2011) 06FE02, 10.1116/1.3660384
 - 7) R. Kometani, S. Nishi, S. Warisawa, and S. Ishihara, Dynamic characteristics control of DLC nano-resonator fabricated by focused-ion-beam chemical vapor deposition, *J. Vac. Sci. Technol. B* **29**, (2011) 06FE03, 10.1116/1.3662493
 - 8) 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** (2011) 06FE06, 10.1116/1.3662083
 - 9) 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**, (2011) 06GJ01, 10.1143/JJAP.50.06GJ01
 - 10) H. Okamoto, N. Kitajima, K. Onomitsu, R. Kometani, S. Warisawa, S. Ishihara and H. Yamaguchi, High-sensitivity charge detection using antisymmetric vibration in coupled micromechanical oscillators, *Appl. Phys. Lett.*, **98**, (2011) 014103, 10.1063/1.3541959
 - 11) 石原直、ナノエレクトロメカニカルシステム(NEMS)のセンサ応用、*応用物理*, **81**, (2012) 21, <http://www.jsap.or.jp/ap/2012/01/ob810021.xml>
- [学会発表] (計 87 件、国際 48、国内 39)
- (1) Y. Murao, R. Kometani, S. Warisawa and S. Ishihara, Height and Edge Shape Correction on the Nanostructure Fabrication by Focused-ion-beam Chemical Vapor Deposition, 25th Int. Microprocesses and Nanotechnology Conf. (MNC2012), Kobe, Japan, Nov. 2 (2012)
 - (2) R. Kometani, S. Mifune, S. Warisawa and S. Ishihara, Evaluation of Resonance Detection Properties on Vibration Measurement of the Mechanical Resonator using Scanning Probe Microscope, 25th Int. Microprocesses and Nanotechnology Conf. (MNC2012), Kobe, Japan, Nov. 1 (2012)
 - (3) J. Dai, K. Onomitsu, R. Kometani, Y. Krockenberger, H. Yamaguchi, S. Ishihara and S. Warisawa, Direct Fabrication of W_xC_y SNS Josephson Junction by Using Focused-ion-beam Chemical Vapor Deposition, 25th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2012), Kobe, Japan, Oct. 31 (2012)
 - (4) D. Guo, R. Kometani, S. Warisawa, S. Ishihara, Ultra-long horizontal free-space-nanowire growth by the real-time feedback control of the scanning speed on focused-ion-beam chemical vapor deposition, 38th Int. Conf. on Micro and Nano Engineering (MNE 2012), Toulouse, France, Sept. 20 (2012)
 - (5) K. Nakano, R. Kometani, S. Warisawa, S. Ishihara, Vibration measurement technique of micro and nano mechanical resonators using tilt dependence of electron beam-induced secondary electron emission, 38th Int. Conf. on Micro and Nano Engineering (MNE2012), Toulouse, France, Sept. 18 (2012)
 - (6) K. Fuse, R. Kometani, S. Ishihara, S. Warisawa, Vibration Characteristics of DLC Nanomechanical Resonator under Parametric Excitation, 38th Int. Conf. on Micro and Nano Engineering (MNE2012), Toulouse, France, Sept. 18 (2012)
 - (7) R. Kometani, K. Kuroda, S. Warisawa and S. Ishihara, Strained-nanomechanical resonator fabrication from HSQ by FIB/EB dual-beam lithography and annealing treatment, 38th Int. Conf. on Micro and Nano Engineering (MNE

- 2012), Toulouse, France, Sept. 18 (2012)
- (8) H. Ashiba, R. Kometani, S. Warisawa and S. Ishihara, Nanomechanical Tuning Forks Fabricated by Focused-Ion-Beam Chemical Vapor Deposition, The 56th Int. Conf. on Electron, Ion and Photon Beam Technology and Nanofabrication (EIPBN2012), Hawaii, May 30 (2012)
- (9) Jun Dai, R. Kometani, S. Warisawa, S. Ishihara, K. Onomitsu, Y. Krockenberger, H. Yamaguchi, Superconductivity of tungsten-containing carbon nanowires fabricated focused-ion-beam chemical vapor deposition, The 56th Int. Conf. on Electron, Ion and Photon Beam Technol. and Nanofabrication (EIPBN2012), Hawaii, May 31 (2012)
- (10) R. Kometani, K. Kuroda, S. Warisawa and S. Ishihara, The three-dimensional nanostructure fabrication from HSQ by FIB/EB dual-beam lithography, The 56th Int. Conf. on Electron, Ion and Photon Beam Technology and Nanofabrication (EIPBN2012), Hawaii, May 31 (2012)
- (11) Oshidari, T. Hatakeyama, R. Kometani, S. Warisawa and S. Ishihara, Quality factor improvement of grapheme resonator by SU-8 shrinkage-induced strain, The 56th Int. Conf. on Electron, Ion and Photon Beam Technol. and Nanofabrication (EIPBN2012), Hawaii, June 1 (2012)

[産業財産権]

○出願状況 (計 4 件)

名称: 微小構造物の製造装置、及び製造方法
発明者: 米谷玲皇, 郭登極, 割澤伸一, 石原直
権利者: 東京大学
種類: 特許
番号: 特願 2012-18557
出願年月日: 2012 年 10 月 1 日
国内外の別: 国内

名称: 超伝導回路の作製方法
発明者: 米谷玲皇, 代俊, 割澤伸一, 石原直,
小野満恒二, 山口浩司
権利者: 東京大学、日本電信電話株式会社
種類: 特許
番号: 特願 2012-187329
出願年月日: 2012 年 8 月 28 日
国内外の別: 国内

名称: 微小機械振動子とその製造方法
発明者: 西駿次郎, 米谷玲皇, 割澤伸一, 石原直, 山口浩司
権利者: 東京大学、日本電信電話株式会社
種類: 特許
番号: 特願 2011-111521

出願年月日: 2011 年 5 月 18 日
国内外の別: 国内

名称: 微小機械振動子の製造方法および微小機械振動子

権利者: 東京大学、日本電信電話株式会社
発明者: 芦葉裕樹, 米谷玲皇, 石原直, 割澤伸一, 山口浩司,

権利者: 東京大学、日本電信電話株式会社
番号: 特願 2011-111517

出願年月日: 2011 年 5 月 18 日
国内外の別: 国内

○取得状況 (計 1 件)

名称: 微小共振器およびその製造方法
発明者: 山口浩司、小野満恒二、加藤慶一、石原直、割澤伸一

権利者: 日本電信電話株式会社、東京大学
種類: 特許

番号: 特許第 5030163 号

取得年月日: 平成 24 年 7 月 6 日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石原 直 (ISHIHARA SUNAO)
東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号: 00422329

(2) 研究分担者

山口 浩司 (YAMAGUCHI HIROSHI)
日本電信電話株式会社・NTT 物性科学基礎
研究所・研究部長・主席特別研究員
研究者番号: 60374071

(3) 研究分担者

割澤 伸一 (WARISAWA SHIN-ICHI)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・
准教授
研究者番号: 20262321

(4) 研究分担者

ドロネー・ジャン・ジャック
(DELAUNEY JEAN-JACQUES)
東京大学・大学院工学系研究科・准教授
研究者番号: 80376516

(5) 研究分担者

米谷 玲皇 (KOMETANI REO)
東京大学・大学院工学系研究科・講師
研究者番号: 90466780