

令和 4 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H03198

研究課題名(和文)分子識別光ナノメカニカル素子の創出

研究課題名(英文) Nanooptoelectromechanical systems for the molecular sensing

研究代表者

米谷 玲皇 (Kometani, Reo)

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：90466780

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、微量のガスのセンシングに資する分子識別ナノメカニカル素子の創出を目的として推進した。具体的には、分子識別ナノメカニカル素子として、プラズモニック構造の光吸収波長の制御性とナノメカニカル振動子の高感度性を活用した光スペクトルを計測可能なNEMS (Nanoelectromechanical systems) スペクトロメーターの研究を行った。結果として、スパイラルブルズアイ構造と円形膜型振動子からなるNEMSスペクトロメーターを提案し、光スペクトル計測を実証するとともに、光検出特性や吸光特性制御に関する基礎的知見を獲得した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、NEMSスペクトロメーターの基礎的原理を実証するとともに、その過程において、プラズモニック構造を利用した光吸収制御やナノメカニカル振動子を利用した光検出に関する知見を獲得した。これら獲得した知見は、プラズモニクスやナノメカニクスを深化させるものであり、その体系化において学術的意義は高い。また、創出したNEMSスペクトロメーターは、光学系不要で光スペクトル計測を実現するデバイスであり、材料科学等の研究分野を加速するとともに、生体物質をバイオマーカーとして利用するヘルスケア技術、デバイスの高度化も推し進めるデバイス技術であり、人の健康や活動の増進に貢献すると期待される。

研究成果の概要(英文)：In this study, a nanomechanical device were researched for the gas molecular sensing. Specifically, the nanoelectromechanical systems (NEMS)-based spectrometer device were developed using a plasmonic device and nanomechanical resonator as the nanomechanical device for the gas molecular sensing. As a result, NEMS spectrometer with a spiral bull's eye structure and a circular membrane resonator were proposed, and optical spectrum measurement was demonstrated. Furthermore, fundamental knowledge of a light detection and a controllability of a light absorption was obtained.

研究分野：荷電粒子ビーム工学，ナノメカニクス，センシング

キーワード：マイクロ・ナノデバイス 光物性 プラズモニクス ナノメカニカル振動子 NEMS ナノメカニクス センシング

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

簡易的な検査で様々な病気の診断が可能であることから呼気診断技術などのヘルスケア技術に関する研究が活発に行われていた。このヘルスケア技術の高度化において鍵となるのが、病気のバイオマーカーとして用いられる生体物質の検出技術である。例えば、呼気診断技術を例に挙げると、糖尿病の場合はアセトンが、消化不良症候群の場合は水素やメタンが、がんの場合はアセトアルデヒドがバイオマーカーとなる。

呼気中に含まれるガス分子を高精度に計測する場合には、従来、例えばクロマトグラフィー技術のような計測技術が用いられてきた。呼気中に含まれるバイオマーカーとなるガス分子は ppm から ppb 濃度で低濃度であり、そのような低濃度で微量のガス分子の計測に非常に適した技術であるが、一方で高価で専門性の高い技術であり、人の生活や活動を支える高度ヘルスケア実現のために、より高精度かつ簡易に、多様な生体物質を検出し、識別するセンサデバイス技術が求められていた。

2. 研究の目的

本研究は、上記した背景を顧みて、微量ガスの光スペクトルでの検出、識別に資する新たなデバイスを創出することを目的とした。具体的には、分子識別デバイスとして、プラズモニック構造の光制御性(光吸収波長の制御性)と、ナノメカニカル振動子の外乱に対する高感度性を複合的に活用した NEMS (Nanoelectromechanical systems) スペクトロメーターデバイスの創出を目指した。

3. 研究の方法

光スペクトル計測を 1 チップのデバイスで実現することを狙い、前述のように、高い光制御性を有するプラズモニック構造と、外乱に対し高い感度を有するナノメカニカル振動子を複合的に活用することを念頭に、NEMS スペクトロメーターに関する研究を進めた。具遺体的には、プラズモニック構造の周期や高さにより特定波長の光を選択的に吸収させ、この吸収(熱)に伴うナノメカニカル振動子の共振周波数変化を読み取り、この特定波長における光強度の計測することを基本とし、これを波長ごとに行っていくことにより、光スペクトルを取得することが可能な NEMS スペクトロメーターの実現を試みた。デバイス構造に関する検討を解析的アプローチを活用しながら進めるとともに、デバイス試作を行い、その光計測特性を評価した。

4. 研究成果

(1) NEMS スペクトロメーターの原理

前述した光スペクトル計測の原理を実行可能な NEMS スペクトロメーターのデバイス構造として、スパイラル型ブルズアイアンテナ構造と円形薄膜型ナノメカニカル振動子を主要コンポーネントとして有するデバイスを提案した。デバイス構造として、デバイスの中心に光強度の計測コンポーネントとなる円形薄膜型ナノメカニカル振動子を配置し、その円周に沿って構造の周期や高さにより光の吸収波長を制御可能なスパイラル型のブルズアイアンテナ構造を配置した。このスパイラル型ブルズアイアンテナ構造は、円形薄膜型ナノメカニカル振動子の円周に沿ってそのピッチを変え、円周の各位置において異なる波長の光を吸収させる形とした。つまり、計測対象となる光は、スパイラル型ブルズアイ構造上に照射されるが、スパイラル型ブルズアイ構造の吸収波長(ピッチ)と、照射光の波長が一致した場合に、光吸収が生じ、その作用が中央の円形薄膜型ナノメカニカル振動子へ誘導され、スパイラル型ブルズアイ構造のピッチにより規定される波長のみ光強度が振動子により検出されることとなる。これを基本とし、スパイラル型ブルズアイ構造上の各位置での光強度を計測していくことで、光スペクトルを取得することを原理とする NEMS スペクトロメーターを提案した。

(2) NEMS スペクトロメーターの作製

光波長範囲 1,450 ~ 1,650 nm のスペクトルを計測することを狙い NEMS スペクトロメーターのデバイス構造を設計し、集束イオンビーム化学気相成長法(focused-ion-beam chemical vapor deposition: FIB-CVD), XeF₂ ガスエッチング, DC スパッタリングを用いたプロセスにより、次のように試作を行った。

- i) Si 基板上に、スパイラル型ブルズアイ構造の骨格構造、下層構造となる構造を、FIB-CVD により作製した。FIB-CVD のガス原料にフェナントレンを用いることで、diamond-like carbon からなる構造を作製した。
- ii) XeF₂ ガスを用いたガスエッチングプロセスにより、DLC 構造をマスクとして Si のエッチングを行い、円形薄膜型振動子のベースとなる DLC 薄膜振動子構造を作製した。
- iii) DC スパッタリングにより、Au 薄膜を製膜し、Au/DLC からなる NEMS スペクトロメーターを作製した。

以上のプロセスにより、10 本の凹凸周期構造からなるスパイラル型ブルズアイ構造、及び直

径 4.7 μm , 内径 (アパーチャ径) 1.2 μm からなる Au/DLC により構成される NEMS スペクトロメーターを作製した。

(3) NEMS スペクトロメーターによる光スペクトルの計測

試作した NEMS スペクトロメーターの光の計測特性を評価した。計測対象となる光は、波長 1550.12 nm, 光強度 31.3 μW のレーザー光とした。本研究では、このレーザー光を、スパイラル型ブルズアイ構造に沿って、その各位置 (各角度) に順に照射、その際の円形薄膜型ナノメカニカル振動子の共振周波数変化を計測し、各照射位置に対する光強度を計測することで、光スペクトルを取得することとした。この光スペクトルの取得は、波長 1550.12 nm のレーザーを組み込んだ光ヘテロダイン微小振動計測装置を用いて各照射位置に対する共振周波数変化を計測することにより試みた。計測は、真空中 (真空度: 10^{-3} Pa) で行い、円形薄膜型ナノメカニカル振動子の励振は、波長 408 nm のレーザーを利用した光熱励振法により行った。

計測対象となる波長 1550.12 nm のレーザー光非照射時の円形薄膜型ナノメカニカル振動子の共振周波数は、61.74 MHz であり、これを基準として、各レーザー光照射位置での共振周波数のシフト量から光スペクトルを取得した。結果として、計測対象としたレーザー光の波長 (波長: 1550.12 nm) と同様な位置において、大きな共振周波数変化を示し、提案した NEMS スペクトロメーターにより、光スペクトルを計測可能であることを実証した。

(4) NEMS スペクトロメーターの高分解能化

有限要素法を用いた解析的アプローチにより、提案した NEMS スペクトロメーターの高分解能化に関する研究を行った。具体的には、NEMS スペクトロメーターの高分解能化に向けて、プラズモンの振る舞いに関する知見をもとに、新たなプラズモニック構造であるスパイラル型ブラッグ構造を提案した。スパイラル型ブラッグ構造は、スパイラル型ブルズアイ構造の周囲に配置することにより表面プラズモンの散逸防止を行い、NEMS スペクトロメーターの高分解能化を行うデバイスである。ブルズアイ、ブラッグリフレクタ構造のデバイス構造とプラズモンの振る舞いとの関係性に関する知見を獲得するとともに、およそ 1.6 倍の高分解能化が達成できることを示した。

(5) まとめ

本研究では、微量のガス分子のセンシングに資する新たなデバイスである NEMS スペクトロメーターを提案、NEMS スペクトロメーターとして光スペクトルを計測できることを実証し、さらに高分解能化にむけた取り組みを行った。デバイス上で光計測を実現するという点においては、特にナノ構造とプラズモンとの関係性に関する理解を深め、これを用いてプラズモンの振る舞いを制御する試みであり、獲得した知見はプラズモニクスを深化させる学術的に意義の高い成果である。

また、創出したデバイスは、光学系不要で光スペクトルの計測を実現するものであり、スパイラル型ブルズアイ構造の設計によっては幅広い波長範囲の光スペクトルに対応できるデバイスである。また、本研究では、呼吸診断技術などのヘルスケア技術へ貢献することを念頭に研究を行ったが、材料科学分野など物質や材料を評価する分野の研究開発へも提案デバイスは有効である。そのような分野の研究開発を支え、加速する計測技術、デバイスにもなりえると期待する。もちろん、ヘルスケア、医療分野においても、バイオマーカーとなる物質の分析技術として有用である。高度な計測技術をチップ化することは、日常や社会活動の中でそれら高度な計測技術を活用できることを意味し、人の健康や活動を身近で支え増進するセンサデバイス技術になると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kohei Tsumune, Shin'ichi Warisawa, Reo Kometani	4. 巻 -
2. 論文標題 Highly sensitive vibration measurement method of nanomechanical resonator using convolutional neural network	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Reo Kometani, Moe Katsuda	4. 巻 60
2. 論文標題 Miniaturization process of three-dimensional nanostructures fabricated by focused-ion-beam chemical vapor deposition	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 128002-1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ac3525	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 米谷 玲皇, 割澤 伸一	4. 巻 60
2. 論文標題 走査電子顕微鏡を利用したNEMSのオペランド動特性計測	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 計測と制御	6. 最初と最後の頁 213-216
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11499/sicejl.60.213	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 M. Saito, S Warisawa and R. Kometani	4. 巻 59
2. 論文標題 Quantification method of stress depth-distribution by micro-Raman spectroscopy for thin film nanomechanical resonator	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Jpn. J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 S11102-1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ab79ed	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 R. Kometani, M. Sekine and S. Warisawa	4. 巻 31
2. 論文標題 Ultra-thin Carbon Nanomechanical Resonator Fabrication and Its Dynamic Property Characterization	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Sensors and Materials	6. 最初と最後の頁 673-681
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18494/SAM.2019.2153	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計31件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 Reo Kometani
2. 発表標題 Optical force measurement by a nanomechanical resonator electrostatically coupled to a cantilever
3. 学会等名 The 2021 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Reo Kometani, Penekwong Khemnat, Shin'ichi Warisawa
2. 発表標題 Fabrication of an optomechanical resonator with a spiral bull's eye antenna for the measurement of light wavelength
3. 学会等名 34rd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kohei Tsumune, Shin'ichi Warisawa, Reo Kometani
2. 発表標題 Highly Sensitive Vibration Measurement Method of Nanomechanical Resonator Using Convolutional Neural Network
3. 学会等名 34rd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaki Saito, Shinichi Ogawa, Yukinori Morita, Shin'ichi Warisawa, Reo Kometani
2. 発表標題 Vibration Spectrum Measurement and Phase-Resolved Image Observation of Nanomechanical Resonators by Helium Ion Microscopy
3. 学会等名 33rd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 津旨 航平, 割澤 伸一, 米谷 玲皇
2. 発表標題 畳み込みニューラルネットワークを利用したナノメカニカル振動子の高感度振動計測
3. 学会等名 第13回集積化 MEMS シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大岩 達典, 割澤 伸一, 米谷 玲皇
2. 発表標題 狭細な透過光スペクトルを有するブルズアイ構造実現のためのスパイラルブラッグリフレクタ
3. 学会等名 第13回集積化 MEMS シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaki Saito, Shinichi Ogawa, Yukinori Morita, Shin'ichi Warisawa, Reo Kometani
2. 発表標題 Evaluation method of vibration spectra of nanomechanical resonators using Helium Ion Microscope
3. 学会等名 The 81st JSAP Autumn Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 米谷 玲皇
2. 発表標題 荷電粒子ビーム技術とナノメカニクス
3. 学会等名 高分子学会 印刷・情報・電子用材料研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 米谷 玲皇
2. 発表標題 荷電粒子ビーム技術とNEMSセンシング
3. 学会等名 電気学会北陸支部学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 米谷 玲皇
2. 発表標題 ナノメカニクスとNEMSセンシング
3. 学会等名 科学技術交流財団 新産業創出に向けたマイクロセンサデバイス研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 米谷 玲皇
2. 発表標題 ナノメカニクスと光センシング
3. 学会等名 分子研研究会「ナノ空間で光が織りなす分子操作・化学反応制御の新展開」（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西田 裕信、割澤 伸一、米谷 玲皇
2. 発表標題 酸化シリコンのチタン支援高速異方性化学エッチングの加工特性評価
3. 学会等名 2019年 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齊藤 正樹、割澤 伸一、米谷 玲皇
2. 発表標題 顕微ラマン分光法による薄膜メカニカル振動子の応力分布計測手法の構築
3. 学会等名 2019年 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Kometani, K. Tanaka, S. Warisawa
2. 発表標題 An optomechanical resonator with a plasmonic half bull 's eye antenna and an aperture for wavelength detection
3. 学会等名 45th International Conference on Micro & Nano Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Nishida, S. Warisawa, R. Kometani
2. 発表標題 Evaluation of etching characteristics on titanium-assisted chemical vapor etching of silicon dioxide
3. 学会等名 45th International Conference on Micro & Nano Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Saito, S. Warisawa and R. Kometani
2. 発表標題 Quantification Method of Stress Depth-Distribution by Micro-Raman Spectroscopy for Thin Film Nanomechanical Resonator
3. 学会等名 32nd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Tanaka, E. Maeda, S. Warisawa and R. Kometani
2. 発表標題 Fabrication of nanomechanical resonators elastically coupled in series for sensitive thermal stress detection
3. 学会等名 62nd International Conference on Electron, Ion and Photon Beam Technology & Nanofabrication (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 ベンエークウォン ケーマナット, 割澤 伸一, 菅谷 俊夫, 橋本 将太, 河野 行雄, 米谷 玲皇
2. 発表標題 光波長計測のためのスパイラル型ブルズアイアンテナを有する光機械振動子の作製
3. 学会等名 2018年第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Tanaka, S. Warisawa and R. Kometani
2. 発表標題 Fabrication of optomechanical nanoresonators elastically coupled in series by focused-ion-beam for wavelength measurement
3. 学会等名 The 79th JSAP Autumn Meeting
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 R. Kometani, M. Sekine and S. Warisawa
2. 発表標題 Ultra thin film carbon mechanical resonator fabrication and its characterization
3. 学会等名 44th International Conference on Micro and Nanoengineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉原 健太, 割澤 伸一, 米谷 玲皇
2. 発表標題 FIB/EB複合リソグラフィーによるナノ光共振器の作製
3. 学会等名 第9回マイクロ・ナノ工学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中 航大, 割澤 伸一, 米谷 玲皇
2. 発表標題 半円型ブルズアイ構造を有する直列連結型ナノメカニカル振動子によるQ値非依存波長計測
3. 学会等名 第9回マイクロ・ナノ工学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 ペンエークウォン ケーマナット, 割澤 伸一, 菅谷 俊夫, 橋本 将太, 河野 行雄, 米谷 玲皇
2. 発表標題 スパイラル型ブルズアイアンテナを有する光機械振動子の作製と光波長検出特性評価
3. 学会等名 第9回マイクロ・ナノ工学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Tanaka, S. Warisawa and R. Kometani
2. 発表標題 Development of Optomechanical Nanoresonators Elastically Coupled in Series for Q Factor Independent Wavelength Measurement
3. 学会等名 31st International Microprocesses and Nanotechnology Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Penekwong, S. Warisawa, T. Sugaya, S. Hashimoto, Y. Kawano and R. Kometani
2. 発表標題 Wavelength Detection by optomechanical resonator with Spiral Bull's Eye Antenna
3. 学会等名 31st International Microprocesses and Nanotechnology Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 米谷 玲皇
2. 発表標題 3次元ナノ構造造形技術とナノメカニクス研究
3. 学会等名 2018年日本表面真空学会学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 R. Kometani, K. Nishikawa, E. Maeda
2. 発表標題 Downsizing of the three-dimensional nanostructure fabricated by focused-ion-beam chemical vapor deposition
3. 学会等名 43rd International Conference on Micro and Nanoengineering (MNE2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 R. Kometani
2. 発表標題 The three-dimensional nanofabrication technology using focused-ion-beam
3. 学会等名 Recent GFIS /advanced ion source microscopy technologies and its future prospects for R & D of materials and devices (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 R. Kometani, K. Okada, E. Maeda
2. 発表標題 Detection Characteristics of Strain of Ultra-thin Silicon Structure by Raman Spectroscopy
3. 学会等名 30th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 R. Kometani
2. 発表標題 The Three-Dimensional Nano- and Microstructure Fabrications by Using Focused Ion Beam
3. 学会等名 2017 Materials Research Society (MRS) Fall Meeting & Exhibit (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 米谷 玲皇
2. 発表標題 荷電粒子ビーム技術とナノメカニクス研究
3. 学会等名 精密工学会 2018年度春季大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究室ホームページ
http://www.lhei.k.u-tokyo.ac.jp/

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	前田 悦男 (Maeda Etsuo) (60644599)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・助教 (12601)	削除：平成29年9月8日

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------