

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2017

課題番号：26709005

研究課題名(和文) 波長計測ナノシステムの創出

研究課題名(英文) Fabrication of nanosystem for wavelength detection

研究代表者

米谷 玲皇 (Kometani, Reo)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：90466780

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 16,300,000円

研究成果の概要(和文)：光通信で用いられる波長安定化装置への応用を狙い、その高精度化、経済化のキーとなる波長計測デバイスに関する研究を行った。外乱を敏感にとらえるナノメカニカル振動子の“高感度性”とプラズモニック構造の光の“制御性”を複合的に活用し、光波長計測を試みた。SiO<sub>2</sub>/Au/SiO<sub>2</sub>からなるサンドイッチ型の両面ホールアレイ構造が、光の吸光制御に有効であることを見出した。また、これを有する光ナノメカニカル振動子を試作した。1550-1562 nmの光に対して、およそ0.92 pmのサブpm分解能での波長計測を達成した。波長安定化装置はもとより、分光技術など光を利用する技術、分野での活用が期待される。

研究成果の概要(英文)：Wavelength measurement device was researched in order to apply the stabilizer for light source on the optical communication technology. Wavelength measurement device was achieved by using nanomechanical structure and plasmonic structure. Nanomechanical device is a sensitive sensing device for various small physical quantities. And, plasmonic structure is a superior structure for controlling the light adsorption. As a result, we found that the sandwich-type hole array structure made of SiO<sub>2</sub>/Au/SiO<sub>2</sub> multi-layer was suitable for controlling the wavelength dependency of adsorption on a mechanical resonator. Then optomechanical resonator was fabricated for wavelength detection, and resolution of 0.92 pm at wavelength region of 1550-1562 nm. The optomechanical resonator is a very powerful device for wavelength detection, and it is useful in various fields such as the optical communication and the fundamental scientific researches.

研究分野：ナノメカニクス

キーワード：波長計測 プラズモニクス ナノメカニクス

### 1. 研究開始当初の背景

近年、光情報通信技術の発展は目覚ましく、さまざまな技術が生み出され、我々の生活や社会、産業を豊かにしている。光通信を支える技術の一つに波長分割多重化技術 (Dense Wavelength Division Multiplexing: DWDM)がある。1本の光ファイバーに、波長を狭間隔 (0.8 nm, 0.4 nm 等) でずらした複数本の光を導入し、通信を行う方式である。大容量通信のキーテクノロジーであり、技術のさらなる経済化、一般化により、我々の社会や産業の発展に一層貢献するものと期待される。

この DWDM を支える技術一つに、光通信光の波長安定化技術、装置がある。上記のとおり DWDM では、極めて狭間隔で波長をずらし光を扱うため、その運用には精密な波長安定化が必要とされている。波長安定化には、如何に精度よく光の波長を計測するかが鍵となる。これまで光フィルタなどの光学部品が用いられ、光波長のずれを検知し、光波長の安定化がはかられてきた。しかし、装置を構成するにあたり、その位置決めなど精密さが要求され、経済化が困難であった。また、より精密に光波長の検出が可能であれば、さらに高密度な DWDM、つまり大容量の光通信が期待される。

### 2. 研究の目的

本研究は、このような背景を顧みて、DWDM 技術のさらなる高度化、高密度化に貢献する波長計測デバイスの創出を目的とした。具体的には、半導体製造プロセス技術で製造可能であり、複雑な光学系を利用しない波長計測デバイスの創出を狙う。

### 3. 研究の方法

本研究では、ナノメカニカル振動子の“高感度性”とプラズモニック構造の“光制御性”を組み合わせ、高分解能な波長計測を目指した。ナノメカニカル振動子は、振動を介して様々な微小物理量を検出可能な NEMS (Nanoelectromechanical Systems) のキーコンポーネントである。これまで zN 感度の力計測[1]や yg 感度の質量計測[2]など、超高感度なセンシングが達成され、さまざまな物理量や物質のセンシングへの応用が期待されている素子である。ナノメカニカル振動子へ外乱 (計測対象) が作用することによる振動の共振周波数や振幅の変化を読み取ることで、質量や力学的、或は電磁気的作用、電荷、スピンなど様々な物質量、物質のセンシングを行うことができる。また、プラズモニック構造は、ナノ構造の光に対する特異性を利用したデバイスである。光の対象波長に対して、ナノ構造の形状や材質、寸法、周期性を設計することで、吸光など光と物質の相互作用についてさまざまな制御が可能である。[3]-[5]本研究は、これらナノメカニカル素

子の物質の物理量の高感度な検知性能とプラズモニック構造の光-物質相互作用の制御性を高度に融合し、波長計測の新たな原理創出を行った。

提案する波長計測原理は、次の通りである。ナノメカニカル振動子上にプラズモニック構造を配置し、これに対して計測対象となる光を照射する。本研究では、波長 1.5  $\mu\text{m}$  帯の光を対象とした。プラズモニック構造によりナノメカニカル振動子への光吸収を波長依存性させ、光波長に依存し発生する熱 (熱応力) による共振周波数変化を読み取るというのが、本研究で提案する波長計測原理である。本研究では、この波長計測原理の実証、また、これによる高分解能波長計測実現を狙い、プラズモニック構造の設計、機能性の検証、ナノメカニカル振動子の熱応力計測への適用をすすめた。

### 4. 研究成果

プラズモニック構造の機能性の検証、そのデバイス構造の設計は、厳密結合波解析法により解析的に実施した。結果として、ナノメカニカル振動子両面にホールアレイが配置された  $\text{SiO}_2/\text{Au}/\text{SiO}_2$  からなるサンドイッチ型のホールアレイ構造が、本研究の吸光制御に有効であることを見出した。ホールアレイ構造の寸法、周期の最適化を行い、ホール径 943 nm、ホール周期 1070 nm であり、 $\text{SiO}_2/\text{Au}/\text{SiO}_2$  多層膜 (厚さ 55 nm/70 nm/280 nm、界面接着層: Ti (厚さ 5 nm)) で構成されるホールアレイ構造が、波長 1.5  $\mu\text{m}$  帯において吸光に強い波長依存性を示すことがわかった。

本研究では、この知見をもとに、サンドイッチ型の両面ホールアレイプラズモニック構造を有する光ナノメカニカル振動子を作製した。ホールアレイ構造の作製は、電子ビームリソグラフィ、スパッタリング、リフトオフプロセスにより行った。具体的には、厚さ 280 nm の熱酸化膜上に、リフトオフプロセスにより Au からなるホールアレイ構造を作製した。その後、RF スパッタリングにより  $\text{SiO}_2$  膜を製膜し、サンドイッチ型のホールアレイとした。その後、サンドイッチ型ホールアレイ構造多層膜をパターニングすることにより光ナノメカニカル振動子の作製を行った。光ナノメカニカル振動子へのパターニングは、集束イオンビームによるエッチング技術を利用して行い、ホールアレイ構造多層膜を振動子型に整形したのち、TMAH (Tetramethylammonium hydroxide) を用いてウェットエッチングを行い、ホールアレイ構造を有する多層膜をメカニカル振動子として Si 基板上に作製した。光ナノメカニカル振動子は、直径 7  $\mu\text{m}$  の円形多層膜を幅 1  $\mu\text{m}$ 、長さ 1  $\mu\text{m}$  の梁で両端を支えた構造とした。また、ホールアレイ構造は、ホール径 906 nm、

周期 1050 nm とであり、SiO<sub>2</sub>/Au/SiO<sub>2</sub> 多層膜の厚さはそれぞれ 61 nm, 75 nm, 280 nm であった。設計値との誤差は、作製誤差である。

光波長検出特性の評価を行った。この光波長検出特性は、光ヘテロダイン振動計を用いて真空(約 10<sup>-3</sup> Pa), 室温環境下で行った。この系において、光メカニカル振動子の加振は、光熱励振法[6]を用いた。この時用いた半導体レーザーの波長, 出力は、それぞれ 408 nm, 20 μW であった。これにより振動子を加振し、632.8 nm のレーザーにより振動子の周波数応答特性を計測した。本研究の波長計測特性は、波長可変レーザーの光波長を計測対象として用いて行った。波長範囲, レーザー出力は 1550-1562 nm, 2.57 mW とした。各波長のレーザー光照射に伴う共振周波数の変化、その際の共振特性を評価し、結果として試作した光ナノメカニカル振動子は、0.92 nm の波長分解能を有することがわかった。

このよう本研究では、サブ pm 分解能の波長計測デバイスの試作を達成した。この結果は、光波長を計測するというセンシング機能実現に、ナノメカニカル振動子及びプラズモニク構造を融合し、複合的に活用することが有効であることを示している。本デバイスの利点は、位置決めなどに精密さが要求される光学系を用いずに、サブ pm での超高分解能波長計測を達成できる点である。機能は、光の波長計測という光の基本物性のセンシングであり、本研究の光通信はもとより、分光技術など光を扱う分野での活用が期待される。

#### <参考文献>

- [1] J. Moser, J. Güttinger, A. Eichler, M. J. Esplandiu, D. E. Liu, M. I. Dykman, A. Bachtold: *Nat. Nanotechnol.* **8**, 493 (2013).
- [2] J. Chaste, A. Eichler, J. Moser, G. Ceballos, R. Rurali, A. Bachtold: *Nat. Nanotechnol.* **7**, 301 (2012).
- [3] C. Genet, T. W. Ebbesen: *Nat.* **445**, 39 (2007).
- [4] T. Thio, K. M. Pellerin, R. A. Linke, H. J. Lezec, T. W. Ebbesen: *Opt. Lett.* **26**, 1972 (2001).
- [5] J. Dintinger, S. Klein, T. W. Ebbesen: *Adv. Mater.* **18**, 1267 (2006).
- [6] S. Nishida, D. Kobayashi, T. Sakurada, T. Nakazawa, Y. Hoshi, H. Kawakatsu: *Rev. Sci. Instrum.* **79**, 123703 (2008).

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

- [1] 米谷 玲皇: “ グラフェンメカニカル構造の機能化 ”, *炭素*, **275**, 191 (2016). (査読有り)
- [2] T. Baba, Y. Lee, A. Ueno, R. Kometani, E. Maeda, R. Takigawa: “ Triple-walled gold surfaces with small-gaps for nonresonance surface enhanced Raman scattering of rhodamine 6G molecules ”, *Journal of Vacuum Science & Technology B*, **34**, 011802 (2016). (査読有り)
- [3] D. Guo, S. Warisawa, S. Ishihara, R. Kometani: “ Mechanical characteristics of ultra-long horizontal nanocantilevers grown by real-time feedback control on focused-ion-beam chemical vapour deposition ”, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, **25**, 125028 (2015). (査読有り)

[学会発表](計13件)

- [1] R. Kometani, T. Murakami, E. Maeda: “ Aluminium-assisted anisotropic chemical vapor etching of silicon dioxide ”, 42nd Micro and Nano Engineering 2016, Congress Center of Reed Messe Vienna, Vienna, Austria, 2016年09月22日
- [2] 米谷 玲皇, 村上 剛浩, 前田 悦男: “ SiO<sub>2</sub> 膜の Al 触媒化学蒸気エッチングとその特性評価 ”, 第77回応用物理学会秋季学術講演会, 新潟県 新潟市 朱鷺メッセ, 2016年09月14日
- [3] R. Kometani, M. Goto, E. Maeda: “ Fabrication of an optomechanical resonator with a two-interface surface plasmonic structure for the wavelength detection ”, The 60th International Conference on Electron, Ion and Photon Beam Technology & Nanofabrication, Wyndham Grand Hotel, Pittsburgh, US, 2016年06月03日
- [4] E. Maeda and R. Kometani: “ Photonic Absorber with Nano-Fins for Wavelength Detection with Mechanical Resonator in Nearinfrared Region ”, 富山県 富山市 富山国際会議場, 2015年11月12日
- [5] 前田 悦男, 米谷 玲皇: “ 光機械振動子を用いた波長測定のための金ナノフィン配列に関する研究 ”, 第7回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 新潟県 新潟市 朱鷺メッセ, 2015年10月30日
- [6] J. Oishi, M. Goto, H. Yamaguchi, E. Maeda, R. Kometani: “ A minimal optical Yagi-uda nanoantenna array for wavelength detection with optomechanical resonator ”, 41th International Conference on Micro and

Nano Engineering, World Forum, The Hauge, The Netherlands, 2015年09月22日

- [7] R. Kometani, T. Miyakoshi, E. Maeda: "Effect of fluorine surface modification on resonance of a carbon nanoresonator fabricated by FIB/EB dual-beam lithography", 41th International Conference on Micro and Nano Engineering, World Forum, The Hauge, The Netherlands, 2015年09月22日
- [8] R. Kometnai, Y. Miyata, E. Maeda: "Characterization of mechanical properties of the carbon mechanical nanostructure fabricated from SU-8 resist by FIB/EB dual-beam lithography", The 59th International Conference on Electron, Ion and Photon Beam Technology & Nanofabrication, Manchester Grand Hyatt, San Diego, US, 2015年05月26日
- [9] 米谷 玲皇: "集束イオンビーム立体ナノ構造形成技術とその高精度化", 第62回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川県, 東海大学, 2015年03月11日
- [10] 米谷 玲皇: "荷電粒子ビーム技術のナノメカニクス研究応用", エレクトロニクス・表面技術フォーラム, 神奈川県, 神奈川県産業技術センター, 2015年02月19日
- [11] R. Kometani and T. Aonuma: "Homogeneous Ultra-Long Overhang Nanostructure Fabrication by Feedback Control of Blanking Time on Focused-Ion-Beam Chemical Vapor Deposition", 27th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, 福岡県, ヒルトン福岡シーホーク, 2014年11月07日
- [12] 米谷 玲皇, 青沼 正: "集束イオンビーム化学気相成長法を用いた長尺オーバーハングナノ構造形成における材料組成の均質化", 第75回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道, 北海道大学, 2014年09月17日
- [13] 米谷 玲皇: "集束イオンビーム立体ナノ構造作製技術とナノメカニクス研究", J A I S T グリーンデバイス研究センターシンポジウム, 石川県, 北陸先端科学技術大学院大学, 2014年06月25日

〔図書〕(計0件)  
該当なし

〔産業財産権〕  
出願状況(計1件)

名称: 微小機械振動構造の作製方法

発明者: 米谷 玲皇, 山口 浩司  
権利者: 米谷 玲皇, 山口 浩司  
種類: 特許  
番号: 特願 2014-187324  
出願年月日: 2014年09月16日  
国内外の別: 国内

取得状況(計0件)  
該当なし

〔その他〕  
ホームページ  
<http://www.nanome.t.u-tokyo.ac.jp>

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者  
米谷 玲皇 (KOMETANI, Reo)  
東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・講師  
研究者番号: 90466780

(2) 研究分担者  
該当者なし

(3) 連携研究者  
該当者なし

(4) 研究協力者  
該当者なし