

光ナノメカニカル素子による超高分解能波長計測

High resolution wavelength measurement by an optomechanical nanodevice



米谷 玲皇 (Reo KOMETANI, Dr. Sci.)

東京大学大学院 新領域創成科学研究科 准教授

(Associate Professor, Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo)

応用物理学会 日本機械学会 精密工学

受賞: 第63回応用物理学会春季学術講演会 Poster Award (2016年) 2010年度精密工学会秋季大会学術講演会ベストプレゼンテーション賞(2010年) The Forth International Nanotechnology Conference on Communication and Cooperation (INC4), The Poster Award for Nanotech in Japan (2008年) 等

著書: 松井真二, 米谷玲皇: “集束イオンビーム CVD による立体ナノ構造形成の動的観察”, (株)エヌ・ディー・エス, ナノイメージング, 第4編, 第3章, 第3節, pp.341-348 (2008年) 松井真二, 米谷玲皇: “集束イオンビームを用いたバイオナノツールの作製と応用”, シーエムシー出版, 細胞分離・操作技術の最前線, 第I編, 第4章 (2008年) 米谷玲皇: ナノ・マイクロスケール機械工学(石原直, 加藤千幸, 光石衛, 渡邊 聡[編]), 第3章 3.2.3節, 第4章 4.1.3節, 及び 4.2.3節, 東京大学出版会 (2014年) 研究専門分野: 荷電粒子ビーム工学 ナノメカニクス

あらまし 高密度波長分割多重化技術 (Dense Wavelength Division Multiplexing : DWDM) 等の光通信における波長安定化技術への応用を目的として、on-chip 波長計測素子に関する研究を行った。具体的には、質量や力学的/電磁気的作用、熱などに対し“高感度性”を有するナノメカニカル振動子と、光に対し“高い制御性”を有するプラズモニック構造を組み合わせた波長計測のための光ナノメカニカル素子に関する研究を行った。ナノメカニカル振動子上にプラズモニック構造を配置、これにより振動子への光吸収(熱吸収)に波長依存性を持たせ、熱吸収に伴う共振周波数の変化から光の波長を読み取るというのが提案する波長計測原理である。

本研究では、1.5 μm 帯の光波長を対象としてプラズモニック構造を設計、 $\text{SiO}_2/\text{Ti}/\text{Au}/\text{Ti}/\text{SiO}_2$ サブ波長金属ホールアレイ構造を有する光ナノメカニカル振動子を作製し、その波長計測特性を評価した。結果として、1547-1563 nm の波長範囲において、およそ 9.1 pm の波長分解能を有することがわかった。この結果は、

光ナノメカニカル素子により、精密な光学系を用いずに高分解能な波長計測が可能であることを示唆している。本研究で目的とする光通信技術への応用はもとより、物質・材料分析のための分光技術など様々な応用が期待される。

1. はじめに

近年、光通信技術の発達は目覚ましく、高密度波長分割多重化 (Dense Wavelength Division Multiplexing : DWDM) 技術*1 などの様々な技術が光通信の高速化、大容量化に用いられ、社会や産業を支え、我々の生活を豊かにしている。光通信技術を支える技術の一つに光源、光波長を管理するための安定化技術、装置がある。波長安定化装置 (波長ロッカー) は、波長管理精度が高くなればなるほど精密さが要求され、如何に波長を高精度に計測するかがその高度化、簡易化、経済化の鍵となる。そのようなことから、筆者らのグループは、波長計測機能の on-chip 素子による実現、波長計測高分解能化を狙い、NEMS (Nanoelectromechanical systems) *2 技術を応用した波長計測に関する研究をすすめてきた。

図1に、提案する計測原理の模式図を示す。ナノメカニカル振動子上にプラズモニック構造を配置、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(熱吸収: T_1, T_2, \dots) に波長依存性を付与し、熱吸収(熱応力)により変化するナノメカニカル振動子の共振周波数 (f_1, f_2, \dots) から光波長 ($\lambda_1, \lambda_2, \dots$) を計測するというのが提案する新たな光波長の計測原理である。

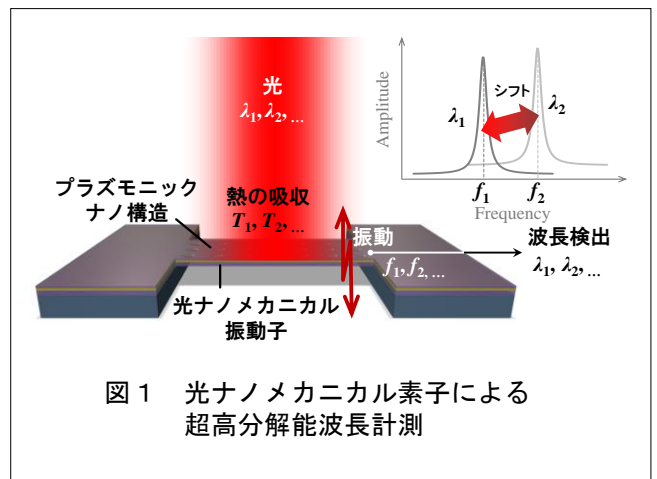


図1 光ナノメカニカル素子による超高分解能波長計測

光ナノメカニカル素子による超高分解能波長計測

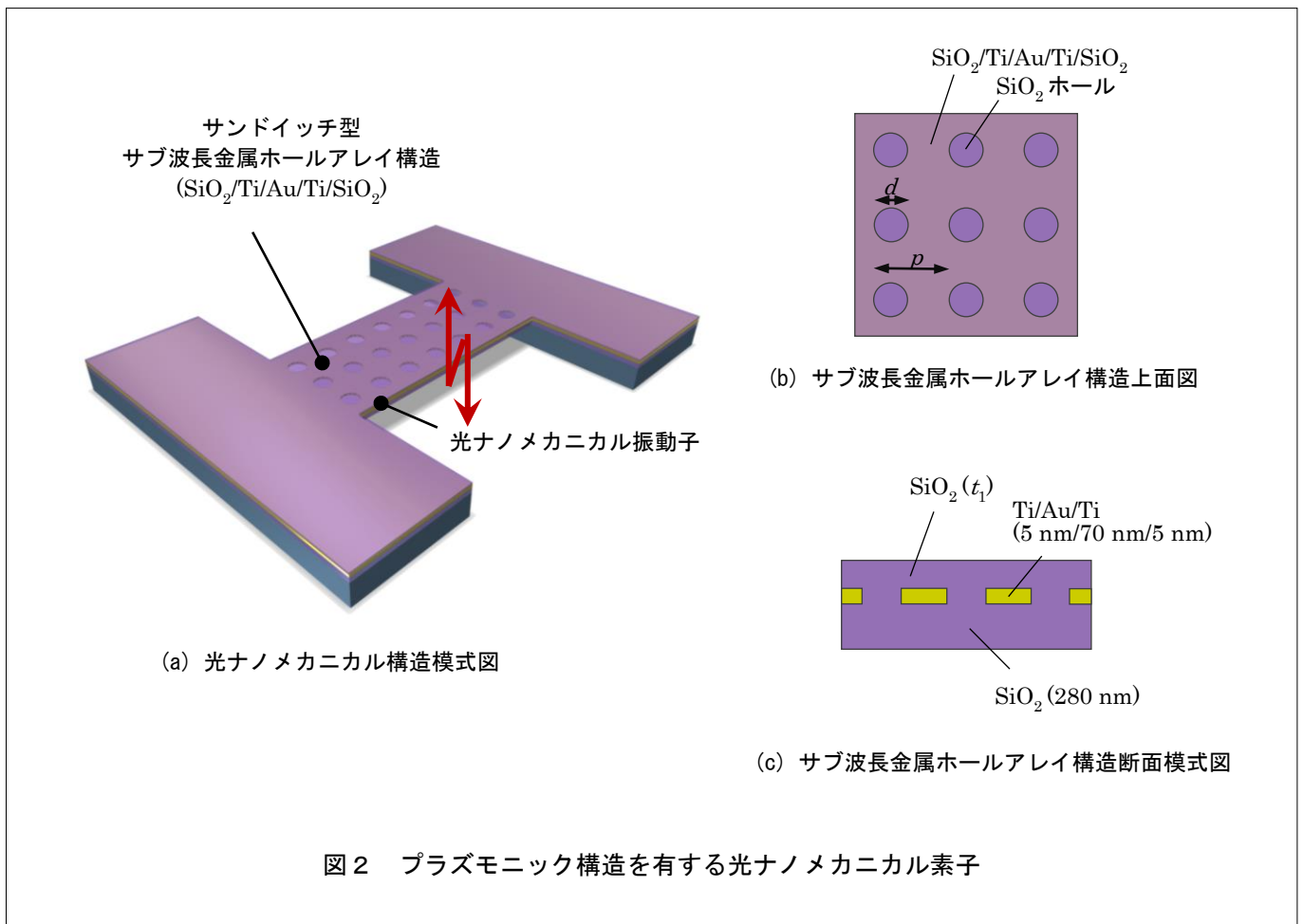
High resolution wavelength measurement by an optomechanical nanodevice

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計測可能な素子である。例えば、カーボンナノチューブからなる振動子により、 yg オーダーの質量検出[1]や $zN/Hz^{1/2}$ 感度の力計測[2]、Si メカニカル振動子を用いた磁気力や光放射圧の計測[3]、また SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) など高性能デバイスと組み合わせることによる $fm/Hz^{1/2}$ 感度の変位計測[4]など、多様な微小物理量の高感度計測が行われてきた。また、ナノ構造の光に対する特異性を利用したプラズモニック素子により、光の吸光、透過制御など様々な機能[5]-[7]が実現されてきた。そのため、プラズモニック構造により吸光波長を選択、吸光(熱)を波長依存させることが可能であり、これを高感度なナノメカニカル振動子と組み合わせ、熱応力の変化に伴う共振周波数変化を読み取ることにより on-chip 素子による波長計測が期待される。

本研究では、本提案の原理の実証、超高分解能な波長計測の実現を目指し、研究を行った。

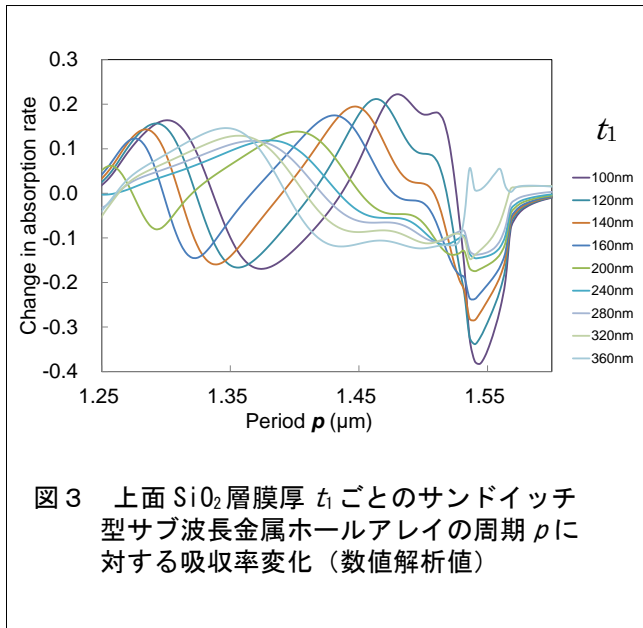
2. 光ナノメカニカル素子の作製

図2に、本研究で作製した光ナノメカニカル素子のデバイス構造模式図を示す。ナノメカニカル振動子は、両持ち梁型とした。また、本研究では、より強い波長依存性をナノメカニカル振動子に付与するために、Au ホールアレイ構造の両面を SiO_2 で覆ったサンドイッチ型の $SiO_2/Ti/Au/Ti/SiO_2$ 構造からなるホールアレイ構造を用いた。Ti 層と SiO_2 層と Au 層の接触ホールアレイ構造の寸法は、厳密結合波解析法を用いて行った。図3に、解析結果例として、上面 SiO_2 層の膜厚 t_1 毎の周期 p に対する吸収率変化量を示す。ホール径 d が 782 nm の Au 層の膜厚、下面 SiO_2 層の膜厚がそれぞれ 70 nm, 280 nm の場合の解析結果である。



光ナノメカニカル素子による超高分解能波長計測

High resolution wavelength measurement by an optomechanical nanodevice



光ナノメカニカル素子の作製は、電子ビームリソグラフィ、蒸着、ウエットエッチング等を用いて行った。図4に、作製プロセス模式図を示す。まず、電子ビームリソグラフィを用いて、ホールアレイ構造作製のためのパターニングを行った。利用した電子ビーム露光レジストは、ZEP-520A (日本ゼオン株式会社) である。本研究では、加速電圧 50 kV、ビーム電流 100 pA の電子ビームを用いた。露光量は 90 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ であった。また、レジストの現像には α -キシレンを用いた。蒸着により Ti/Au/Ti 膜を製膜した。接着層である Ti は 5 nm とした。その後、リフトオフを行い、Ti/Au/Ti からなるホールアレイ構造を作製した。続いて、SiO₂ 膜を RF スパッタリングにより製膜した。このときの RF 出力、Ar 流量、ベース真空度は、それぞれ 100 W, 20 sccm, 10^{-4} P とした。膜厚は 120 nm であった。これにより、内部に Ti/Au/Ti からなるホールアレイ構造を有する SiO₂/Ti/Au/Ti/SiO₂ 多層膜を作製した。さらに、集束イオンビームを用いて SiO₂/Ti/Au/Ti/SiO₂ 多層膜を振動子形状にパターニングした。このエッチング加工には、加速電圧 30 kV、ビーム電流 236 pA の Ga⁺ 集束イオンビームを用いた。照射量は、 1.35×10^{18} ions/cm² であった。その後、集束イオンビームによりパターニングした多層膜全体を振動子とするために、下層 Si 層のウエットエッチングを行った。このプロセ

スでは、TMAH (Tetramethylammonium hydroxide) 系ウエットエッチング溶液である PureEtch160 (林純薬工業株式会社) を用いた。なお、溶液温度は 85 °C とした。

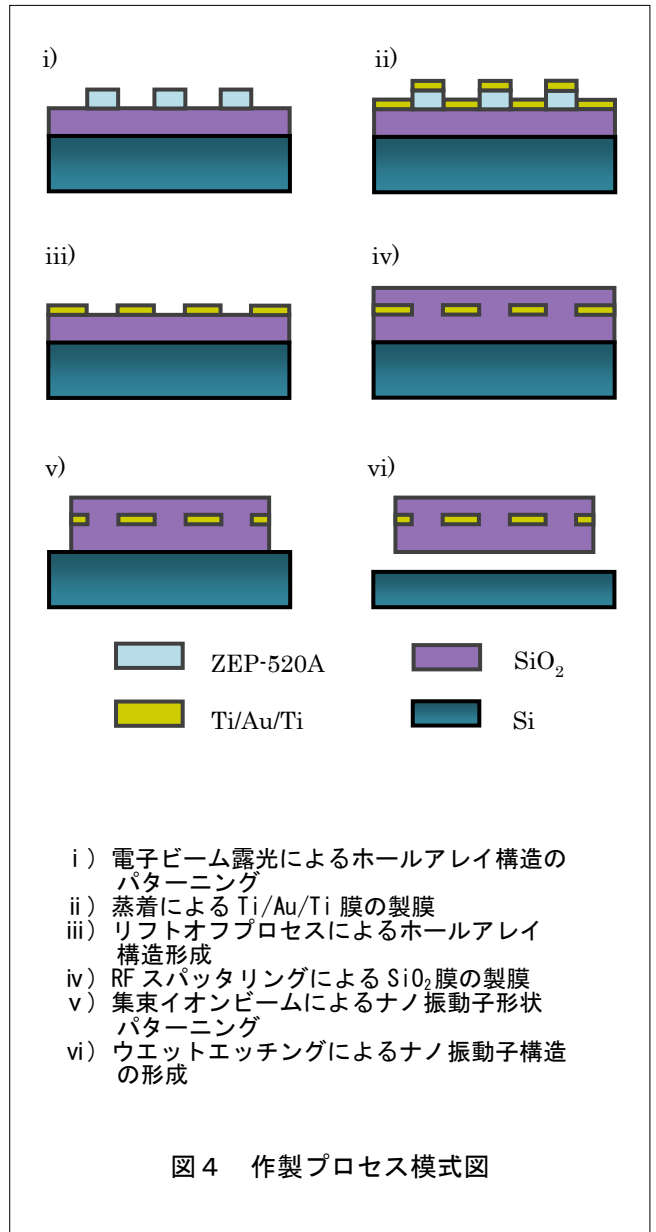


図5に、作製した光ナノメカニカル素子の走査電子顕微鏡写真を示す。振動子寸法は、長さ 9.6 μm 、幅 4.6 μm であった。また、ホールアレイ構造の直径 d 、周期 p 、上面 SiO₂ 層の厚さ t_1 、Au 層の厚さは、それぞれおよそ 840 nm, 1.460 μm , 110 nm, 60 nm であった。

光ナノメカニカル素子による超高分解能波長計測

High resolution wavelength measurement by an optomechanical nanodevice

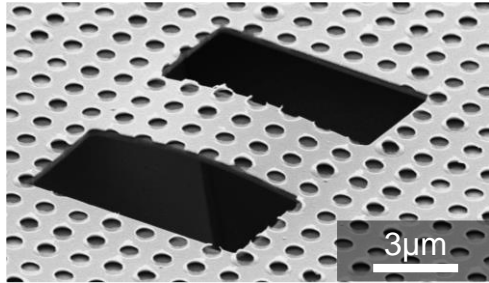


図5 光ナノメカニカル素子の走査電子顕微鏡写真

3. 波長計測特性の評価

光ナノメカニカル振動子の共振特性、波長計測特性の評価を行った。図6(a)に、共振特性、波長計測特性の評価実験系の模式図を示す。測定環境は、室温、真空環境下 (5×10^{-3} Pa) とした。また、振動子の加振は、光熱励振法[8]*3を用いて行った。この光熱励振法においては、波長 408 nm、出力 20 μW の半導体レーザーを用いた。また、共振特性の計測は、光ヘテロダ

イン微小振動計を用いて行った。共振特性計測は、波長 632.8 nm、出力 2 μW のレーザーを用いて行った。加えて、計測対象として、本研究では、波長 1.542 nm-1563 nm の波長可変レーザーを用いた。このとき、照射レーザー光の出力は、全ての波長において 1.8 mW とした。図6(b)に、レーザー非照射時、波長 1550 nm のレーザー非照射時の共振スペクトルを示す。

レーザー非照射時の共振周波数は、10.96 MHz、Q値は 188 であった。また、レーザー照射によりその共振周波数は減少し、およそ 10 kHz の変化が生じた。加えて、照射レーザー光波長に対する共振周波数の変化を図7に示す。共振周波数変化の傾向は、図7に示すように、吸収率（解析値）の変化傾向におおよそ沿う形となった。共振周波数の変化は、光吸収（熱）の影響によるものであることを示唆している。また、これらの共振周波数変化の波長依存性から、波長計測分解能を算出した。振動子の周波数分解能 δf_0 は、以下のように表される。

$$\delta f_0 = \sqrt{\frac{k_B T \Delta f}{8\pi^3 f M_{eff} x_c^2 Q}}$$

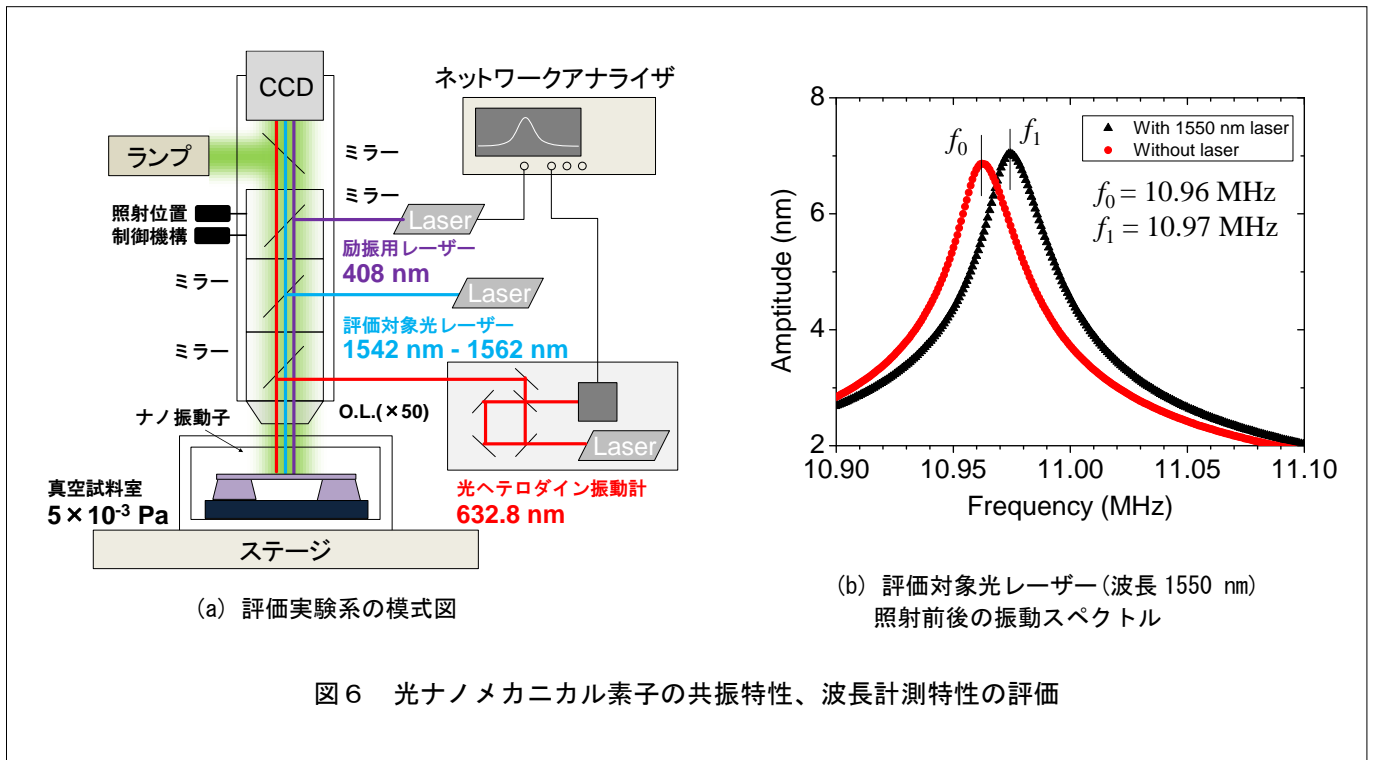


図6 光ナノメカニカル素子の共振特性、波長計測特性の評価

光ナノメカニカル素子による超高分解能波長計測

High resolution wavelength measurement by an optomechanical nanodevice

ここで、 k_B はボルツマン定数、 T は環境温度、 Δf は測定系のバンド幅である。また、 f , M_{eff} , x_c , Q は、それぞれ振動子の共振周波数、有効質量、振幅、 Q 値である。さらに、波長分解能 $\delta\lambda$ は、光波長の変化量 $\Delta\lambda$ 、共振周波数変化 Δf 、周波数分解能 δf を用いて、 $(\Delta\lambda \cdot \delta f) / \Delta f$ と表される。結果として、作製した光ナノメカニカル振動子は、およそ 9.1 pm の波長分解能を有することがわかった。この結果は、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”により、on-chip デバイスにより高分解能な波長計測が可能であることを示している。

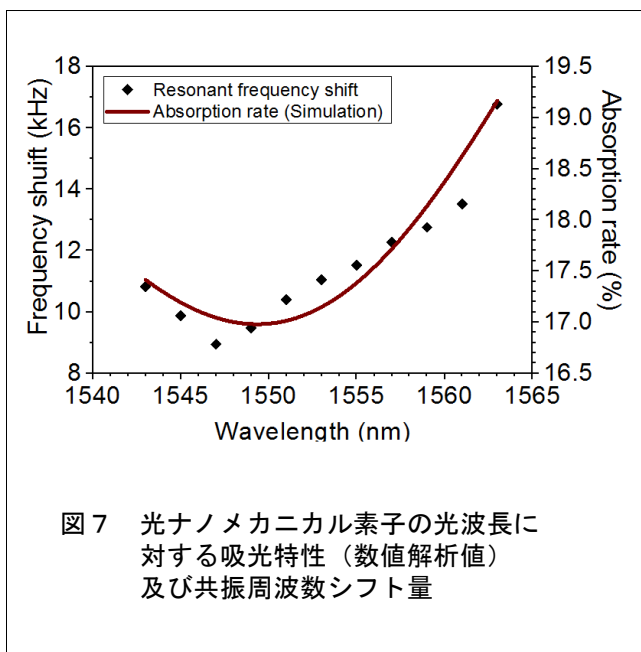


図7 光ナノメカニカル素子の光波長に対する吸光特性（数値解析値）及び共振周波数シフト量

4. おわりに

本研究では、レーザー波長安定化のための on-chip 波長計測素子の創出を狙い、ナノメカニカル振動子とプラズモニック構造を複合的に活用した光メカニカル素子、及びこれによる新たな光波長計測原理を提案し、波長分解能 9.0 pm を達成した。干渉計などの精密な光学系を用いずに、極めて高分解能な波長計測素子実現が可能である。また、本提案の素子、計測原理は、光波長という基礎物理量計測に関するものであり、材料評価、分析のための分光技術など、光を利用する様々な技術への応用、展開が期待される。

用語解説

*1 波長分割多重化技術

光通信大容量化技術の一つである。一本の光ファイバーに異なる複数の波長の光を入れ通信する手法である。光ファイバーへの入射光の波長間隔により、CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) と DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) に大別される。CWDM の場合、波長間隔は 20 nm であり、DWDM の場合、波長間隔は 0.8 nm や 0.4 nm 等となる。これにより、一本の光ファイバーで大容量の通信を可能としている。

*2 NEMS (Nanoelectromechanical systems)

ナノスケールの微小電気機械デバイス、システムの総称である。半導体製造プロセス技術などの超微細加工技術を用いて作製される。NEMS の代表的素子として、本稿でも取り上げているナノメカニカル振動子が挙げられる。ナノメカニカル振動子の場合、質量付加や電磁氣的／力学的作用など、振動子が有する様々な作用からの影響を受け共振特性（共振周波数や振幅等）を変化させる性質を利用し、その変化量を読み取ることで、それら作用した物理量をセンシングすることが可能である。センシング対象の多様性から、様々なセンサ素子への応用が期待されている。

*3 光熱励振法

微小メカニカル振動子の加振手法の一つである。構造体に光を照射すると、熱応力が発生することを利用する。レーザー光を加振する振動子に照射し、振動子の共振周波数等特定の周波数でレーザー光を変調する。これにより、振動子に周期的に熱応力を発生させ、振動子を加振する。

参考文献

[1] J. Chaste, A. Eichler, J. Moser, G. Ceballos, R. Rurali, A. Bachtold: Nat. Nanotechnol. **7**, 301 (2012).
[2] J. Moser, J. Güttinger, A. Eichler, M. J. Esplandiu, D. E. Liu, M. I. Dykman, A. Bachtold: Nat. Nanotechnol. **8**, 493 (2013).

光ナノメカニカル素子による超高分解能波長計測

High resolution wavelength measurement by an optomechanical nanodevice

- [3] T. Ono, M. Esashi: *Rev. Sci. Instrum.* **74**, 5141 (2003).
- [4] S. Etaki, M. Poot, I. Mahboob, K. Onomitsu, H. Yamaguchi, H. S. J. van der Zant: *Nat. Phys.* **4**, 785 (2008).
- [5] C. Genet, T. W. Ebbesen: *Nat.* **445**, 39 (2007).
- [6] T. Thio, K. M. Pellerin, R. A. Linke, H. J. Lezec, T. W. Ebbesen: *Opt. Lett.* **26**, 1972 (2001).
- [7] J. Dintinger, S. Klein, T. W. Ebbesen: *Adv. Mater.* **18**, 1267 (2006).
- [8] S. Nishida, D. Kobayashi, T. Sakurada, T. Nakazawa, Y. Hoshi, H. Kawakatsu: *Rev. Sci. Instrum.* **79**, 123703 (2008).
- [9] K. L. Ekinci, Y. T. Yang M. L. Roukes *Appl. Phys.* **95**, 2682 (2004).

この研究は、平成25年度SCAT研究助成の対象として採用され、平成26～27年度に実施されたものです。