

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760025

研究課題名(和文) 超薄膜メカニカル光波検出素子に関する研究

研究課題名(英文) Research on the ultra-thin film mechanical resonator for high resolution 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) 2,800,000円、(間接経費) 840,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、波長分割多重化通信技術を活用した次世代大容量アクセスネットワーク実現に資する光波検出素子の創出である。本研究では、ナノメカニカル振動子とプラズモニック構造を活用した波長計測に関する研究を行った。また、超高分解能な波長計測を達成するために、ナノメカニカル振動子の高Q値化に関する研究も進めた。結果として、支持部の曲げを利用した歪印加手法が振動子の高Q値化に有効であることを示した。また、U型キャビティ構造を有するナノメカニカル振動子により2.2 pmの波長分解能で光の波長計測ができることを示した。

研究成果の概要(英文)：Aim of this study is development of a high resolution wavelength detector for a next generation large-capacity access network. Wavelength measurement had been researched using a nanomechanical resonator and plasmonic structure. In addition, Q factor improvement method had been researched in order to achieve the high resolution wavelength detection. As a result, strain applying method using clamp bending of a resonator was useful to obtain a high Q factor mechanical resonator. And, the wavelength detection with a resolution of 2.2 pm was demonstrated by a nanomechanical resonator with U-shaped cavities.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・薄膜・表面界面物性

キーワード：ナノメカニクス プラズモニクス 超薄膜 集束イオンビーム ナノ機械振動子 NEMS 波長計測 光通信

1. 研究開始当初の背景

現代の人の生活、社会を支える通信ネットワークは、光通信の導入により急速な高速・大容量化を果たしてきた。そして、波長分割多重化 (Wavelength Division Multiplexing: WDM) 通信により基幹ネットワークの高速・大容量化が達成されている。今や、アクセスネットワーク (家庭や公共機関等の末端ネットワーク) への WDM 技術の導入が検討され始めている。

ここで問題となっているのが波長の精密制御・安定化技術である。WDM ネットワーク構築には、通信用レーザーの波長を安定化する波長ロッカー等の光制御モジュールが必要であるが、さまざまな提案がなされているものの、高精度な光学系で構成される現在の光制御モジュール (特に光検出コンポーネント) は高価であり、小型化・低コスト化が必須のアクセスネットワークには適用できないのが現状である。そのため安価に高い機能を実現できる新しい原理に基づいた光波検出素子の研究開発が急務となっていた。

2. 研究の目的

前述した背景のもと、本研究では、次世代大容量光通信実現のキーデバイスの創出を目的として、超薄膜ナノメカニカル振動構造体を活用した光波検出メカニカル素子の創製、光検出原理の確立、及びその高性能化を目指した。

3. 研究の方法

光波長の高分解能計測という課題に対し、様々な微小物理量を検知可能なナノメカニカル振動子を活用した。本研究では、光吸収の材料、或いは形状依存性を利用した光の波長計測原理を提案した。図1に示すように、ナノメカニカル振動子に光を照射すると、振動子上で波長依存する光吸収量によって熱が発生する。熱が及ぼす共振特性 (共振周波数) の変化を読み取ることで光の波長を計測するというのが、本研究で提案した波長計測原理である。本手法を用いて高分解能な波長計測を達成するには、

- (1) ナノメカニカル振動子の基礎特性の向上 (機械振動の高 Q 値化)
- (2) ナノメカニカル振動子上での光に対する波長選択性、光吸収率の制御

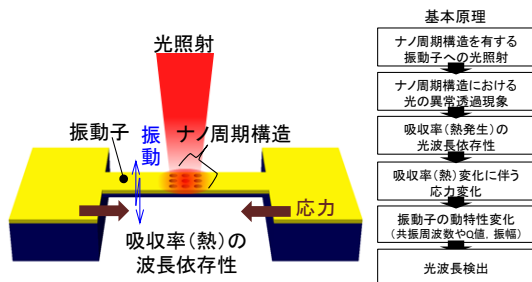


図1 ナノメカニカル振動子による光波長計測の基本原則

を行う必要があった。そのため本研究では、これらを要素課題として研究を進め、ナノメカニカル振動子を活用した高分解能波長計測を目指した。

4. 研究成果

(1) ナノメカニカル振動子の高 Q 値化

前述したように、振動子を用いて波長依存する熱量変化を共振特性 (共振周波数) 変化から高分解能に読み取るためには、振動子自身の高 Q 値化手法を確立する必要がある。本研究では、Si, ダイヤモンド/ライクカーボン (DLC), グラフェン製の幅数 100 nm, 厚さ数 100 nm ~ 原子層の寸法を有する極微細な薄膜振動子の高 Q 値化を、歪印加手法を用いて試みた。歪印加手法は、機械振動子に引張歪を印加することにより、機械振動の熱弾性ダンピングが抑制され、Q 値が改善されると考えられている手法である。本手法を本研究の薄膜材料に適用するにあたり、効果的な歪印加手法を確立するとともに、その効果を評価する必要があった。

図2に、本研究において適用性を検証した振動子の一つである両持ち型グラフェン機械振動子を示す。また、原子層材料であるグラフェンは、その軽量さ、優れた機械特性から超高感度振動子型センサの構造材料として期待されている材料である。本研究では、図2(a)に示すように、金属 (Au/Cr)/レジスト (HSQ) 2層構造を機械振動子の支持部として用いる歪印可手法を考案した。このように支

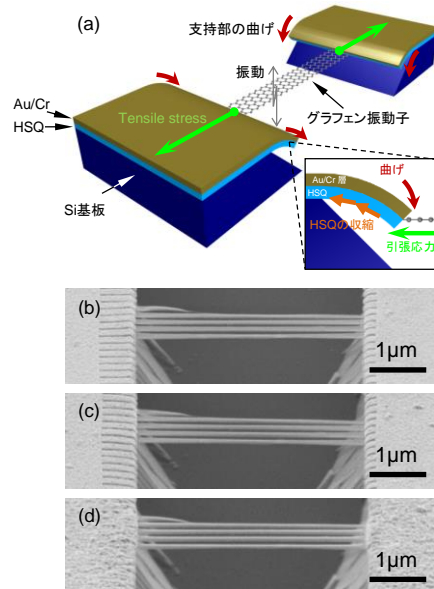


図2 歪印加グラフェン振動子: (a) 金属 (Au/Cr)/レジスト (HSQ) 2層構造を利用した歪印加原理, (b) 歪印加前のグラフェン振動子のグラフェン振動子の電子顕微鏡写真, (c) 400°C, 3時間 及び(d) 800°C, 2時間 アニール処理による歪印加後のグラフェン振動子の電子顕微鏡写真

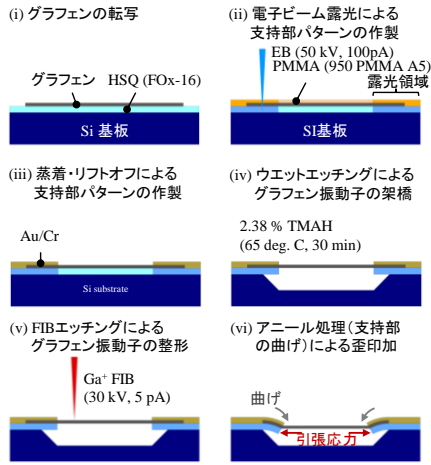


図3 歪印加グラフェン振動子作製プロセス模式図

持部に熱収縮率の異なる2層構造を設けることにより、アニール処理により金属層、レジスト層の熱収縮率の違いを利用し、支持部を曲げることが可能となる。この支持部に2層構造を備えたグラフェン振動子の作製は、図3に示すように、キッシュグラフィートからSi基板上のHSQレジスト上に転写したグラフェンを、電子ビーム露光技術等を用いて加工することにより行った。グラフェンの整形は、集束イオンビームを用いて行った。最終的に、約 5×10^{-3} Pa の真空下で高温アニール処理を施すことにより、支持部を曲げ、グラフェン振動子に引張応力を印加した。図2(b)-2(d)は、その作製結果の電子顕微鏡写真である。長さ、幅、層数はそれぞれ $4.7 \mu\text{m}$, 200 nm , 3層のグラフェン振動子である。

共振特性の評価は、光ヘテロダイン振動計を用いて、真空度約 5×10^{-3} Pa、室温という環境下で行った。図4に共振特性の計測結果を示す。結果として、図4(a)に示すように、アニール処理温度の増加とともに、共振周波数とともに、Q値も劇的に改善されることが

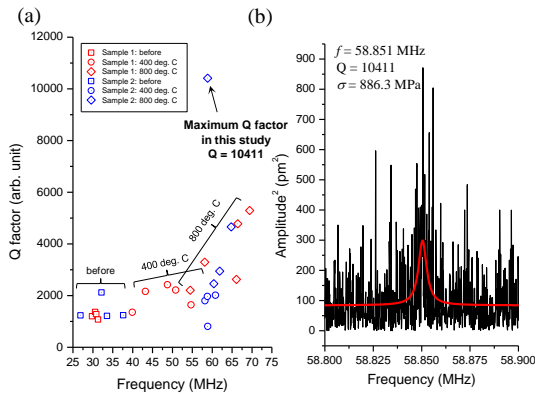


図4 歪印加がグラフェン振動子の共振特性へ与える効果：(a) アニール処理温度に伴う共振特性変化 (F-Qプロット), (b) 最大Q値(10411)における振動スペクトル

わかった。この結果は、原子層数層のメカニカル構造体においても引張応力印加により熱弾性ダンピングが抑制されていることを示唆している。図4(b)に示すように、本研究で得られた最高Q値は、共振周波数 58.851 MHz の振動子において10411であった。過去に報告されている真空下、室温という同様の環境で計測されたグラフェン振動子のQ値(数1000程度)に対し、本研究で得られたQ値は比較的高い値である。これは、本研究で考案した支持部を曲げることによる歪印加手法が、室温環境下においてQ値を改善するための有効な手法であることを示している。ナノメカニカル振動子を利用した微小物理量のセンシングにおいて、Q値は検出対象に依らず高感度センシングを達成するための重要な基礎特性であり、本研究で獲得した成果により、本研究目的の光波長計測以外の振動子型センサ作製においてもその室温高性能化技術となりえるものと期待される。

(2) ナノメカニカル素子上でプラズモニック構造を活用した光波長計測

本研究では、ナノメカニカル振動子を活用した新たな波長計測法を提案した。ナノメカニカル振動子を用いた光波長の計測は、前述のとおり光照射に伴い発生する熱量変化を共振特性変化として取り出すことで行った。本研究の計測対象となる光の波長は、 $1535 \text{ nm} \sim 1565 \text{ nm}$ である。この波長範囲の光を高感度に計測するためには、本波長範囲において光の吸収率を任意に波長依存させる必要があった。本研究では、振動子上で任意波長範囲、光吸収率の制御を行うために、プラズモニック構造を利用した。プラズモニック構造により振動子に波長選択性を付与するとともに、振動子上での吸収率制御することにより発生熱に波長依存性を付与した。

プラズモニック構造としてU型キャビテ

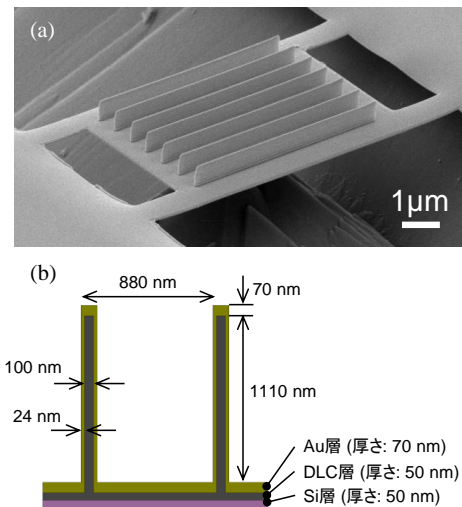


図5 U型キャビティ構造を備えた機械振動子：(a) 電子顕微鏡写真, (b) 作製したU型キャビティの断面模式図及び寸法

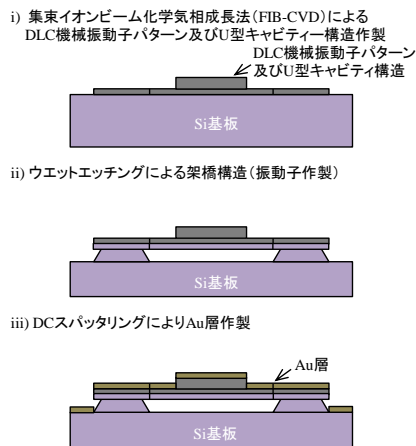


図 6 U 型キャビティ構造を備えた Au/DLC 機械振動子作製プロセス模式図

ィ構造を用いた例を図 5 (a) に示す。U 型キャビティ構造の特徴は、形状、材料による任意範囲の波長選択が可能であるとともに、高分解波長計測達成に必須の幅広い吸収率制御が可能であることである。U 型キャビティ構造に光が照射されると、プラズモンによりキャビティ内部に光渦が形成される。この光渦により、照射された光は共鳴波長においてほとんど反射することなく幅広い波長範囲での吸収率制御が可能となる。

本研究では図 6 に示すように、集束イオンビーム化学気相成長法 (以下、FIB-CVD) を活用し、U 型キャビティ構造を有するナノメカニカル振動子を作製した。FIB-CVD は、原料ガス雰囲気下で FIB の照射時間、照射位置を精密に制御することにより様々な構造体をボトムアップ形成することのできる技術である。図 5 (b) に U 型キャビティ構造の断面模式図を示す。

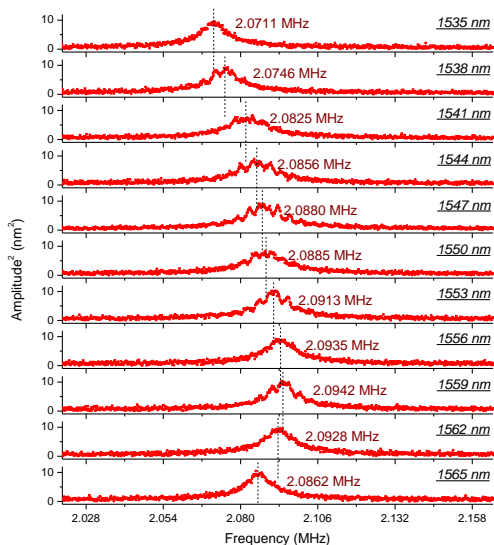


図 7 U 型キャビティ構造を備えた機械振動子共振特性の照射光波長依存性

U 型キャビティ構造を有する振動子の光波長に対する共振特性変化は、光ヘテロダイン振動計により計測した。計測対象は、波長範囲 1535 nm ~ 1565 nm, 出力 1 mW のレーザー光であった。共振周波数の照射光波長依存性を図 7 に示す。共振周波数は、照射光波長に応じて変化した。スペクトル解析より本提案のナノメカニカル振動子の波長計測分解能は、およそ 2.2 pm であることがわかった。DWDM 光通信技術で主に用いられている波長間隔 (0.8 nm 或いは 0.4 nm) を考慮すると、この結果は、本提案の振動子及びその波長計測原理は光通信応用に対し十分な分解能を有することがわかる。

以上のように、本研究では超高分解能波長計測の達成に向け、室温高 Q 値化技術、及びナノメカニカル振動子とプラズモニック構造を活用した波長計測原理を構築した。本研究により獲得した知見、技術は、さまざまな高感度振動子型センサの基盤となりえるものである。本研究目的の光通信への応用に加え、分光器などの先端的科学機器の高度化を促すものと期待できる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件,)

- ① J. Dai, K. Onomitsu, R. Kometani, Y. Krockenberger, H. Yamaguchi, S. Ishihara, Shin'ichi Warisawa: "Superconductivity in Tungsten-Carbide Nanowires Deposited from the Mixtures of W(CO)₆ and C₁₄H₁₀", Japanese Journal of Applied Physics **52**, 075001 (2013). 査読有 DOI: 10.7567/JJAP.52.075001
- ② D. Guo, R. Kometani, S. Warisawa, S. Ishihara, "Growth of ultra-long horizontal free-space-nanowire by the real-time feedback control of the scanning speed on focused-ion-beam chemical vapor deposition", Journal of Vacuum Science & Technology B **31**, 061601 (2013). 査読有
- 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**, 37 (2012). 査読有 DOI: 10.2494/photopolymer.25.37 DOI: 10.1116/1.4824170
- ④ D. Guo, R. Kometani, S. Warisawa, S. Ishihara, "Three-Dimensional Nanostructure Fabrication by Controlling Downward Growth on Focused-Ion-Beam Chemical Vapor Deposition", Japanese Journal of Applied Physics **51**, 065001 (2012). 査読有 DOI: 10.1143/JJAP.51.065001
- ⑤ H. Ashiba, R. Kometani, S. Warisawa, Sunao Ishihara: "Nanomechanical tuning forks fabricated using focused-ion-beam chemical vapor deposition", J. Vac. Sci.

- Technol. B **30**, 06FD03 (2012). 査読有
DOI: 10.1116/1.4766315
- ⑥ 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**, 117201 (2012). 査読有
DOI: 10.1143/APEX.5.117201
- ⑦ 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 (2011). 査読有
DOI: 10.1116/1.3662493
- ⑧ R. Kometani, T. Hatakeyama, K. Kuroda, S. Warisawa, S. Ishihara, “Carbon nanomechanical resonator fabrication from PMMA by FIB/ electron-beam dual-beam lithography”, J. Vac. Sci. Technol. B, **29**, 06FE06 (2011). 査読有
DOI: 10.1116/1.3662083
- [学会発表] (計 19 件)
- ① 米谷 玲皇, 中野 和洋, 石原 直, 割澤 伸一: “走査電子顕微鏡を利用した微小機械振動子の動特性プロファイリング”, 2014 年第 34 回応用物理学会春季田学術講演会, 青山学院大学, 神奈川県 2014/03/18
- ② R. Kometani, Y. Murao, S. Ishihara, S. Warisawa: “The growth height correction on the three-dimensional nanostructure fabrication using focused-ion-beam chemical vapor deposition”, 26th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2013), 6C-2-2, Oral, Royton Sapporo, Hokkaido, Japan, 2013/11/07
- ③ 米谷 玲皇: “荷電粒子ビーム技術とナノメカニクス研究”, 公益社団法人 新化学技術推進協会 電子情報技術部会 MEMS 分科会講演会, 新化学技術推進協, 東京都, 2013/10/15 (招待講演)
- ④ 米谷 玲皇: “ナノメカニクスとその波長計測への応用”, 2013 年第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 同志社大学, 京都府, 2013/09/16 (招待講演)
- ⑤ 米谷 玲皇, 村尾 裕規, 石原 直, 割澤 伸一: “FIB-CVD を用いた 3 次元ナノ構造形成における構造形成高さの補正”, 2013 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 関西大学, 大阪府, 2013/09/13
- ⑥ Reo Kometani, Hui Liu, Shin'ichi Warisawa, Sunao Ishihara: “Optomechanical resonator fabrication with the surface plasmon antenna for the wavelength detection”, The 57th International Conference on Electron, Ion, and Photon Beam Technology and Nanofabrication (EIPBN2013), 9C-2, Oral, Nashville, US, 2013/05/31
- ⑦ 米谷 玲皇, 劉 瑾, 割澤 伸一, 石原直: “光波長検出微小機械振動子の作製と特性評価”, 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川工科大学, 神奈川県 2013/03/29
- ⑧ 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 International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2012), Oriental Hotel, Kobe, Japan, 2012/11/01
- ⑨ 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 International Micro & Nano Engineering Conference (MNE 2012), Toulouse, France, ポスター, 2012/09/17
- ⑩ 米谷 玲皇, 黒田 耕平, 割澤 伸一, 石原 直: “FIB/EB 複合リソグラフィによる HSQ からの 3 次元ナノ構造作製”, 第 73 回秋季応用物理学関係連合講演会, 愛媛大学・松山大学, 愛媛県, 2012/09/12
- ⑪ R. Kometani: “FIB/EB Dual-beam Lithography”, Next Generation Lithography Workshop 2012 (NGL2012), 東京工業大学, 東京都, 2012/07/20
- ⑫ R. Kometani, K. Kuroda, S. Warisawa and S. Ishihara: “The three-dimensional nanostructure fabrication from HSQ by FIB/EB dual-beam lithography”, The 56th International Conference on Electron, Ion and Photon Beam Technology and Nanofabrication (EIPBN2012), Hawaii, USA, 口頭, 2012/05/31
- ⑬ 米谷 玲皇, 畠山 大輝, 黒田 耕平, 割澤 伸一, 石原 直: “FIB/EB 複合リソグラフィによるカーボンナノ機械振動子の作製とその特性評価”, 2012 年第 59 回応用物理学関係連合講演会, 早稲田大学, 東京都, 2012/03/15
- ⑭ R. Kometani, S. Warisawa, S. Ishihara: “Q Factor Improvement of DLC Nanoresonator using a Fluorine Surface Coating”, The 6th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21 2011), Omiya Sonic City, Saitama, Japan, 口頭, 2011/11/10
- ⑮ R. Kometani, K. Kuroda, S. Warisawa and S. Ishihara: “Strained Carbon Nanomechanical Resonator Fabrication from SU-8 by FIB/EB Dual-beam Lithography and Annealing Treatment”, 24th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2011), ANA Hotel Kyoto, Kyoto, Japan, 口頭, 2011/10/27
- ⑯ 米谷 玲皇, 畠山 大輝, 黒田 耕平,

割澤 伸一, 石原 直: “FIB/EB デュアルビームリソグラフィによるカーボンナノ機械振動子の作製”, 2011年第3回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, タワーホール船橋, 東京都, 2011/09/26

- ⑰ R. Kometani, H. Shimizu, S. Warisawa, S. Ishihara: “Relationship between Q factor and the surface condition of the DLC nanoresonator fabricated by focused-ion-beam chemical vapor deposition”, 37th International Conference on Micro and Nano Engineering (MNE2011), Berlin, Germany, ポスター, 2011/09/20
- ⑱ R. Kometani, T. Hatakeyama, K. Kuroda, S. Warisawa, S. Ishihara: “Carbon Nanomechanical Resonator Fabrication from PMMA by FIB/EB Dual-Beam Lithography”, The 55th International Conference on Electron, Ion and Photon Beam Technology and Nanofabrication (EIPBN2011), Las Vegas, Nevada, USA, 口頭, 2011/06/02
- ⑲ R. Kometani, S. Nishi, S. Warisawa, S. Ishihara: “Dynamic Characteristics Control of DLC Nano-Resonator Fabricated by Focused-Ion-Beam Chemical Vapor Deposition”, The 55th International Conference on Electron, Ion and Photon Beam Technology and Nanofabrication (EIPBN2011), Las Vegas, Nevada, USA, ポスター, 2011/06/01

[図書] (計 1 件)

- ① 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).

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 光検出振動子、光波長計測装置、光波長計測方法、および光検出振動子の作製方法

発明者: 米谷玲皇, 石原直, 割澤伸一, 劉琿, 守屋和樹, 山口浩司, 岡本創

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 2013-171972

出願年月日: 2013年8月22日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

該当無し

[その他]

東京大学大学院工学系研究科
機械工学専攻 米谷研究室ホームページ
<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・講師
研究者番号: 90466780
- (2) 研究分担者
該当者無し
- (3) 連携研究者
該当者無し