

令和元年6月25日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K19026

研究課題名(和文)単一ナノ構造テラヘルツ科学の創成

研究課題名(英文)Creation of single nanostructure terahertz science

研究代表者

河野 行雄 (Kawano, Yukio)

東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授

研究者番号：90334250

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：テラヘルツ(THz)帯の光子エネルギー(meV)は、様々な固体中電子や格子の励起エネルギー、高分子の振動や分子間相互作用に対応する重要な領域である。そのため、THz技術は、物質科学・生命科学の強力な計測ツールとなることが期待されている。ところが、光領域と電波領域に挟まれたTHz帯は、幅広い電磁波帯の中で他帯域に比べると発展が遅れており、特に可視光に比べて2,3桁波長が長い(数百 $\mu\text{m}$ のスケール)、THz波計測によるナノセンシングの研究は未確立である。本研究では、THz波の局所集光並びに高感度信号読み出しを達成し、金属、半導体、高分子の詳細な物性解析が可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電磁波の幅広い周波数帯の中で、テラヘルツ(THz)帯の計測技術は光領域と電波領域に挟まれているため、他帯域に比べて成熟していない。本研究から、THz波の波長よりも小さなナノスケール領域における分析が可能となり、様々な材料の詳細な観察・解析に適用できる。今後の物質・生体分析に向けて新たな応用可能性を示した点に意義がある。

研究成果の概要(英文)：Photon energy (meV) in the terahertz (THz) band is an important region corresponding to electrons in various solids, phonon energy, polymer vibration and intermolecular interaction. Therefore, THz technology is expected to be a powerful tool for studying materials science and life science. However, the THz band, which is sandwiched between the light region and the radio wave region, is behind in development in a wide electromagnetic wave band compared to other bands. Because the wavelength (several hundreds of  $\mu\text{m}$ ) is much longer than that of the visible light, nanoscale-sensing with THz measurements has not been established yet. In this study, we achieved local focusing of THz waves and high sensitivity signal readout, and successfully performed detailed analysis of metals, semiconductors, and polymers.

研究分野：テラヘルツ工学

キーワード：テラヘルツ

## 様式 C-19、F-19、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ (THz) 帯の光子エネルギー (meV) は、様々な固体中電子や格子の励起エネルギー、高分子の振動や分子間相互作用に対応する重要な領域である。そのため、THz 技術は、物質科学・生命科学の強力な計測ツールとなることが期待されている。ところが、光領域と電波領域に挟まれた THz 帯は、幅広い電磁波帯の中で他帯域に比べると発展が遅れており、特に可視光に比べて 2, 3 桁波長が長い (数百  $\mu\text{m}$  のスケール)、THz 波計測によるナノセンシングの研究は未確立である。

### 2. 研究の目的

以上を背景として、われわれがこれまでに半導体やナノカーボン材料による THz 研究で培ってきた強みを活かし、本研究では、THz のナノスケール検出並びに信号読み出しをそれぞれ工夫することで、単一構造体の分析を可能にすることを目的とする。

### 3. 研究の方法

THz 波の局所集光と検出信号読み出しの高感度化がポイントとなる。

#### (1) THz 局所集光のためのプローブ

ワイヤ状材料により、THz 光を局所的に集中させる。

#### (2) 高感度信号読み出し

ナノカーボン材料、特に原子層膜材料であるグラフェンの利用により、検出信号を高感度に読み出す。

#### (3) 単一構造体の分析

半導体、金属、高分子の分析に応用する。

### 4. 研究成果

「3. 研究の方法」(1) では、表面が保護された高品質のワイヤ材料を用いて、効率よくテラヘルツ波をナノ領域に集中させられることを実験的に示した。(2) では、グラフェンの使用により大きなテラヘルツ検出信号を発生させられることを示した。

計測に影響を与える揺らぎの除去などを行い、システムを安定化した上で材料分析への応用研究を行った。その結果、(1) 表面プラズモンの伝搬と局在化、(2) 単一ドットからの高強度光放射、(3) 有機高分子の高次構造を可視化できた。以上から、電子・光物性における重要な知見を得ることができた。

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 12 件)

1. X. Deng, L. Li, M. Enomoto, and Y. Kawano, “Continuously Frequency-Tuneable Plasmonic Structures for Terahertz Bio-sensing and Spectroscopy”, *Scientific Reports* **9**, 3498-1-9 (2019). 査読有り
2. 河野 行雄, 菅谷 俊夫, “テラヘルツ帯プラズモニック構造体とフレキシブル撮像素子”, *次世代センサ* **28**, 2-5 (2019). 査読無し
3. Hasan Ahmad, Daichi Suzuki, and Yukio Kawano, “Strain-induced photo-thermoelectric terahertz detection”, *AIP Advances* **8**, 115002-1-6 (2018). 査読有り
4. Takuya Okamoto, Toshio Sugaya, Naoki Fujimura, Kou Ishikawa, and Yukio Kawano, “Near-Field

- Infrared Investigations of an Arm-Terminated Spiral Structure with Bow-tie Probe”, Journal of Physics Communications **2**, 105004-1-8 (2018). 査読有り
5. Daichi Suzuki, Yuki Ochiai, Yota Nakagawa, Yuki Kuwahara, Takeshi Saito, and Yukio Kawano, “Fermi-level-controlled semiconducting-separated carbon nanotube films for flexible terahertz imagers”, ACS Applied Nano Materials **1**, 2469–2475 (2018). 査読有り
  6. Xiangying Deng and Yukio Kawano, “Surface Plasmon Polariton Graphene Mid-Infrared Photodetector with Multi-Frequency Resonance”, Journal of Nanophotonics **12**, 026017-1-8 (2018). 査読有り
  7. Xiangying Deng, Marolop Simanullang and Yukio Kawano, “Ge-Core/a-Si-Shell Nanowire-Based Field-Effect Transistor for Sensitive Terahertz Detection”, Photonics **5**, 13 (2018). 査読有り
  8. D. Suzuki, Y. Ochiai, Y. Kawano, “Thermal device design for a carbon nanotube terahertz camera”, ACS Omega **3**, 3540–3547 (2018). 査読有り
  9. 鈴木 大地、河野 行雄, “テラヘルツ帯電磁波を活用した医薬品・有機膜の非破壊非接触品質分析”、分析化学 **66**, 893–899 (2017) 査読有り
  10. T. Iguchi, T. Sugaya, and Y. Kawano, “Silicon-immersed terahertz plasmonic structures”, Applied Physics Letters **110**, 151105-1-4 (2017). 査読有り
  11. 河野 行雄, “テラヘルツ化学の勃興—異分野への架け橋とその魅力—”、現代化学(東京化学同人) pp.47–52 (2018年7月号) 査読無し
  12. Xiangying Deng and Yukio Kawano, “Terahertz Plasmonics and Nano-Carbon Electronics for Nano-Micro Sensing and Imaging”, International Journal of Automation Technology **12**, 87-96 (2018). 査読有り

[学会発表] (計 24 件)

- [1] Y. Kawano, “Multi-View Terahertz Inspection with Carbon Nanotube”, International Conference on Electronic Materials and Nanotechnology for Green Environment (ENGE 2018), (Nov. 11-14, 2018, Jeju, Korea)
- [2] Y. Kawano, “Carbon nanotube omnidirectional terahertz cameras”, 7th Russia-Japan-USA-Europe Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies & 4<sup>th</sup> TERAMIR International Laboratory Workshop (September 17-21, 2018, Warsaw, Poland)
- [3] Y. Kawano, “Nano-carbon terahertz imagers: Multi-view and super-resolution measurements and their applications to materials and biological non-destructive analysis”, 55th

- Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium (September 11-13, 2018, Tohoku University)
- [4] Y. Kawano, “Terahertz Imagers and Spectrometers with Nanostructured Semiconductors and Carbon Materials”, International Symposium on Micro/nano Optoelectronic Materials and Devices (Beijing, China, Aug 10-12, 2018)
  - [5] Y. Kawano, “Nano-Carbon Flexible Photonics and Plasmonics for Terahertz Imaging and Spectroscopy”, Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS) (August 1-4, 2018, Toyama)
  - [6] Y. Kawano, "Terahertz Photon Detectors", Light-driven Nuclear-Particle physics and Cosmology 2017 (Yokohama, April 2017)
  - [7] Ryoichi Yuasa, Takuya Okamoto, Akira Sasagawa, Yukio Kawano, Nanoscale Observation of Mid-Infrared Field Distribution in a Stamp-Type Plasmonic Structure, International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, Sep. 2018.
  - [8] Kou Li, Daichi Suzuki, Yuki Ochiai, Yukio Kawano, Sensitivity Enhancement of Photothermoelectric Terahertz Detectors with Series Combination between Carbon Nanotubes and Metals, 43rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, Sep. 2018.
  - [9] Takuya Okamoto, Akira Sasagawa, Yota Harada, Satsuki Nakano, Wataru Norimatsu, Michiko Kusunoki, Yukio Kawano, Visualization of Zero-Dimensional Plasmons in Graphene Quantum Dots with Near-Field Infrared Microscopy, International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves 2018 (IRMMW-THz 2018), Sep. 2018.
  - [10] Kou Li, Daichi Suzuki, Yuki Ochiai, Meiling Sun, Yukio Kawano, Carbon Nanotube Film Flexible Terahertz Detectors on Polymer Films with Series Electrodes for Sensitivity Enhancement, 7th International Workshop on Nanocarbon Photonics and Optoelectronics, Aug. 2018.
  - [11] Kou Li, Daichi Suzuki, Yuki Ochiai, Yukio Kawano, Thermoelectric Device Design of Carbon Nanotube Terahertz Imagers for Sensitivity Enhancement, 19th International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low-dimensional Materials, Jul. 2018.
  - [12] Takuya Okamoto, Yoshikazu Ito, Takeshi Fujita, Yukio Kawano, Photothermoelectric Terahertz Detection with p-n Junction Nanoporous Graphene, Graphene 2018, Jun. 2018.
  - [13] Takuya Okamoto, Naoki Fujimura, Weilu Gao, Junichiro Kono, Yukio Kawano, Response of Localized Carriers to Terahertz Radiation in a Carbon Nanotube Film, The 54rd Fullerenes-Nanotubes-Graphene Symposium, March 2018.
  - [14] Takuya Okamoto, Daichi Suzuki, Yukio Kawano, Analyzing Nanoscale Optical and Thermal Properties in Nanoporous Graphene by Near-Field Infrared Microscopy, 42nd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), Oct. 2017.
  - [15] Takuya Okamoto, Yoshikazu Ito, Takeshi Fujita, Yukio Kawano, Optical Control of Weak Localization in Nanoporous Graphene, The 53rd Fullerenes-Nanotubes-Graphene Symposium, Sep. 2017.

- [16] Takashi Iguchi, Toshio Sugaya, Takashi Iguchi, Yukio Kawano, Resonant frequency tuning and transmission enhancement of terahertz plasmonic antenna by dielectric engineering, 42nd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz), 2017.
- [17] 河野 行雄、“ナノカーボン材料によるフレキシブルテラヘルツ帯カメラと検査応用”、第2回 Kyudai global Open Innovation Network Engine ミーティング (2019年2月22日、九州大学)
- [18] 河野 行雄、“ナノカーボン材料によるフレキシブル・ウェアラブルテラヘルツ帯カメラとマルチビュー画像検査技術”、第14回ナノカーボン先端技術交流会 (2019年1月9日、大宮ソニックシティ)
- [19] 河野 行雄、“ナノカーボン材料並びにプラズモニック構造によるテラヘルツ帯撮像素子—マルチビュー計測と超解像計測—”、電子情報通信学会テラヘルツ応用システム研究会 (2018年12月17日～18日、東北大学)
- [20] 河野 行雄、“テラヘルツ物質・バイオ分析：ナノカーボン材料・プラズモニクスの応用”、第15回プラズモニック化学研究会シンポジウム (2018年11月9日～12日、首都大学東京)
- [21] 河野 行雄、“ナノカーボン材料によるテラヘルツデバイス・計測：物質・バイオ分析への応用”、第37回電子材料シンポジウム (2018年10月10日～12日、ホテル&リゾート長浜)
- [22] 河野 行雄、“カーボンナノチューブ・グラフェンによる新規テラヘルツ帯イメージャー—マルチビュー計測と超解像計測—”、『グラフェニクスのための高感度センサ・テラヘルツ光発光素子の開発』講演会 (2018年10月3日、徳島大学)
- [23] 河野 行雄、“テラヘルツ帯フレキシブルカメラと超回折限界分光イメージャー：カーボンナノチューブ・グラフェンとプラズモニクスの応用”、第52回センサ&アクチュエータ技術シンポジウム「未踏の周波数を開拓する：テラヘルツ波の発生・検出とその応用」(2018年5月24日、化学会館)
- [24] 河野 行雄、“テラヘルツイメージングによる新規非破壊検査と品質管理”、第77回分析化学討論会「品質保証を支える分析技術」(龍谷大学、2017年5月)

〔図書〕(計 1件)

Y. Kawano, “Nano-Carbon Terahertz Sensors and Imagers”, Sensors for Diagnostics and Monitoring (CRC Press, Taylor & Francis Group), Chapter 1, pp. 1-25, (2018).

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

○取得状況 (計 0件)

名称：

発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページの URL：  
<http://diana.pe.titech.ac.jp/kawano/index.html>

研究代表者の受賞：1 件

## 6. 研究組織

(1) 研究分担者  
なし

(2) 研究協力者  
なし