

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26600010

研究課題名(和文)単一分子テラヘルツ分光イメージングの創成

研究課題名(英文)Development of single-molecule terahertz spectroscopic imaging

研究代表者

河野 行雄 (Kawano, Yukio)

東京工業大学・量子ナノエレクトロニクス研究センター・准教授

研究者番号：90334250

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：テラヘルツ電磁波を用いた分光イメージング技術では、解像度の向上が課題である。本研究は、特に物質科学・分子科学・生命科学の分野において求められているナノメートルレベルの解像度を目的とした。高精度走査機構と周波数可変テラヘルツ検出器を融合させることで近接場テラヘルツ分光素子を創出した。これにより、微細な半導体試料のテラヘルツ画像・分光解析を可能にした。

研究成果の概要(英文)：One concern with terahertz spectroscopic imaging is low spatial resolution. This research project was aimed at achieving nanometer-scale resolution, which is in strong demand in materials, molecular, and biological research. By combining tunable terahertz detectors with fine positioning, we have developed near-field terahertz spectroscopic imaging devices. The implementation of this system has enabled us to obtain frequency-selective, near-field terahertz images of semiconductor devices.

研究分野：エレクトロニクス、計測工学

キーワード：テラヘルツ

## 1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ (THz,  $10^{12}$ Hz) 電磁波を用いた技術は、無機・有機材料、生体系、宇宙・天体系など自然科学の多岐にわたる分野で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、他帯域に比べ技術的に成熟していない領域となっている。THz 波計測の中でも分光イメージングは、対象物を可視化して直接的な情報を得ることができるため、きわめて有用な手段である。特に物質科学や生命科学では nm レベルの空間分解能(解像度)が求められることがしばしばある。ところが、従来の多くの技術では、mm や  $\mu$  m レベルの分解能にとどまっており、nm 分解能の THz 分光イメージングの実現に向けては、さらなるブレークスルー的進展が必要となる。

## 2. 研究の目的

物質科学・分子科学・生命科学の分野において強力な手段となる THz 分光イメージングにおいて、ナノメータ空間分解能を目指す。これにより、単一ナノ材料・単一分子の THz 画像・分光解析を実現する。本研究により、ナノ空間中の電子や高分子についての理解が進展することが期待できる。

## 3. 研究の方法

近接場光(エバネッセント光)は強度が微弱であるため、高い信号雑音比を得る機構を創出することが鍵となる。この観点から、THz 電場増強効果ならびに検出器自体による高感度 THz 分光、の2点の工夫を導入する。

### (1) THz 検出素子の最適構造の決定

THz 光をナノメータの領域に局在、かつ電場増強する素子を開発する。電磁界シミュレーションと素子作製・測定の両面から最適構造を決定する。

### (2) THz 分光検出器の利用

検出器自体で周波数チューニングしながら信号を読み出す機構を利用する。高精度走査系を構築し、この検出器と組み合わせる。

### (3) 物質・材料分析応用

開発したシステムを用いて、半導体や高分子試料の分析を行う。

## 4. 研究成果

フィードバックメカニズムを用いて、THz

検出器そのものを試料表面上で位置制御しながら高精度に走査する機構を開発した。結果的に、波長よりも遙かに微小なサイズに対応する、高い空間解像度で、かつ周波数を選択可能な、“近接場 THz 分光素子”を創出した。この素子により、THz 波に対する透明/非透明試料の透過分布観察をナノメータ分解能で達成した。さらに、半導体の電子伝導に伴う THz 発光を画像化し、電極からの電子注入の機構について、THz 周波数の違いに基づいて理解することが可能となった。また、単一ナノ材料の THz 透過分布、ならびにスペクトルを得ることができた。

## 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 7 件)

- [1] Xiaowei He, Naoki Fujimura, J. Meagan Lloyd, Kristopher J. Erickson, A. Alec Talin, Qi Zhang, Weilu Gao, Qijia Jiang, Yukio Kawano, Robert H. Hauge, François Léonard and Junichiro Kono, “Carbon Nanotube Terahertz Detector”, *Nano Letters* **14**, 3953-3958 (2014). 査読有り
- [2] 河野 行雄, “グラフェンのテラヘルツ・赤外光検出応用”、レーザー研究 Vol. 42, pp. 645-651 (2014). 査読有り
- [3] Kristopher J. Erickson, Xiaowei He, A. Alec Talin, Bernice Mills, Robert H. Hauge, Takashi Iguchi, Naoki Fujimura, Yukio Kawano, Junichiro Kono, François Léonard, “Figure of Merit for Carbon Nanotube Photothermoelectric Detectors”, *ACS Nano* **9**, 11618-11627 (2015). 査読有り
- [4] Yukio Kawano, “Terahertz Response of Carbon Nanotubes and Graphene”, *Journal of the Physical Society of Japan* **84**, 121010-1-9 (2015) 査読有り

- [5] 河野行雄, “低次元電子系の機能に基づくテラヘルツ波検出・分光・撮像デバイス”, 応用物理 84, 643-647 (2015). 査読有り
- [6] Y. Kawano, “Chip-Based Near-Field Terahertz Microscopy”, IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, in press. 査読有り
- [7] 河野行雄, 瀧田 佑馬, “THz 分光測定のコツ”, 「応用物理」基礎講座、2016年5月号掲載予定 査読なし

[学会発表] (計 20 件)

- [1] Y. Kawano, “Terahertz Imager and Spectrometer with Nanostructured Semiconductor and Graphene Devices”, 3rd Russia - Japan - USA Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies (NY USA, June 2014). (Invited)
- [2] Y. Kawano, “Active and Passive Near-Field Terahertz Microcopy”, 5th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (Singapore, May 2014). (Invited)
- [3] Y. Kawano, “Semiconductor and Graphene Devices for Nanoscale Terahertz Imaging and Spectroscopy”, 5th International Symposium on Terahertz Nanoscience, (Martinique, 5 Dec. 2014). (Invited)
- [4] 河野行雄, “ナノ構造によるテラヘルツ波検出・分光・撮像デバイスとその応用”, 応用物理学会・テラヘルツ電磁波技術研究会、大阪大学、2014年11月21日 (招待講演)
- [5] Y. Kawano, “Nanoscale Terahertz Imaging and Spectroscopy of 2D Materials”, 2014 Bring the Nanoworld Together, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, 24 Sep. 2014. (Invited)
- [6] 藤村直紀, 石川昂, 陸昂義, 小田俊理, 河野行雄, “近接場光顕微鏡を用いた中赤外ログスパイラルアンテナの解析”, 第62回応用物理学会春季学術講演会、東海大学、2015年3月11日
- [7] 井原敏, 小田俊理, 河野行雄, “FDTD法によるテラヘルツ帯プラズモニックアンテナの小型化検討”, 第75回応用物理学会秋季学術講演会、北海道大学、2014年9月19日
- [8] Satoshi Ihara, Shunri Oda, Yukio Kawano, “Miniaturization of bull’s eye antenna structure with solid immersion method”, Optical Terahertz Science and Technology 2015, San Diego, CA, U.S.A., 10 March 2015.
- [9] Daichi Suzuki, Naoki Fujimura, Tomoyuki Hirano, Shunri Oda and Yukio Kawano, Terahertz detectors for sensing and imaging applications, 2015 AOTULE Student Conference (Nov. 1-3, 2015), Singapore. (Invited)
- [10] Daichi Suzuki, Naoki Fujimura, Tomoyuki Hirano, Shunri Oda and Yukio Kawano, Terahertz detectors for sensing and imaging applications, 7th Multidisciplinary International Student Workshop (MISW 2015) (Aug. 6-7, 2015), Tokyo, Japan.
- [11] Yukio Kawano, Nanoscale Terahertz Spectroscopic Imager with GaAs and Graphene Devices, Joint Symposium of 3rd International Symposium on Microwave/Terahertz Science and Applications (MTSA 2015) and 6th International Symposium on Terahertz Nanoscience (TeraNano 6) (Jun. 30- Jul. 4, 2015), Okinawa, Japan. (Invited)
- [12] T. Iguchi, N. Fujimura, Yukio Kawano, S. Oda, X. He, Q. Zhang, W. Gao, and

J. Kono, Mid-infrared Photoresponse of Highly-Aligned Carbon Nanotube Array, Joint Symposium of 3rd International Symposium on Microwave/Terahertz Science and Applications (MTSA 2015) and 6th International Symposium on Terahertz Nanoscience (TeraNano 6) (Jun. 30- Jul. 4, 2015), Okinawa, Japan.

[13] Daichi Suzuki, Shunri Oda, and Yukio Kawano, Terahertz sensing and imaging with graphene and carbon nanotube devices, 16th International Conference on the Science and Application of Nanotubes (NT15) (Jun. 29- Jul. 3, 2015), Nagoya, Japan.

[14] Daichi Suzuki, Shunri Oda, and Yukio Kawano, Terahertz sensing and imaging with graphene and carbon nanotube devices, Third Carbon Nanotube Thin Film Electronics and Applications Satellite (Jun. 28, 2015), Nagoya, Japan.

[15] Yukio Kawano, Nanoscale Terahertz Imaging and Spectroscopy with Nanostructured Semiconductor and Graphene Devices, 4th Terahertz Technology Workshop (Jun. 26, 2015), Seoul, Korea. (**Invited**)

[16] Yukio Kawano, Semiconductor and Graphene Devices for Nanoscale Terahertz Imaging and Spectroscopy, IEEE International Microwave Symposium (IMS2015) (May 18-21, 2015), Phoenix, USA. (**Invited**)

[17] 河野 行雄、“ナノ領域におけるテラヘルツ波センシング・イメージング技術の開発とその応用”、平成27年度第1回カーボンナノ材料研究会（大阪、2015年6月19日）（招待講演）

[18] 河野 行雄、“カーボンナノチューブ・グラフェン素子を用いたナノスケール

テラヘルツ波検出・分光・撮像技術”、グラフェンコンソーシアム第8回研究講演会（東京、2015年10月7日）（招待講演）

[19] 河野 行雄、“グラフェンを用いたナノ領域テラヘルツ分光イメージングデバイス”、シンポジウム「テラヘルツ科学の最前線 II」（宮城、2015年11月19～20日）（招待講演）

[20] 河野 行雄、“カーボンナノチューブ・グラフェンを用いたナノスケールテラヘルツ波デバイス・システム”、日本真空学会・12月研究例会「カーボン系新材料研究の現状と展望」（東京、2015年12月16日）（招待講演）

〔図書〕（計 2 件）

Y. Kawano, “Terahertz Technology Based on Nano-Electronic Devices”, High-Speed Devices and Circuits with THz Applications (CRC Press), Chapter 1, pp. 1-26, 2014.

Y. Kawano, Nano-Carbon Terahertz Detector, one chapter in Terahertz Sensing and Imaging: Devices and Systems (CRC Press), in press.

〔産業財産権〕

○出願状況（計 1 件）

名称：テラヘルツ検出センサ及びテラヘルツ画像測定装置

発明者：河野行雄

権利者：東京工業大学

種類：

番号：特願2015-244218

出願年月日：2015年12月15日

国内外の別：国内

○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：

Gottfried Wagener Prize 2014

ドコモ・モバイル・サイエンス賞 2015

研究協力者の受賞：

国際会議の最優秀賞やポスター賞など計 4 件

「光技術 その軌跡と挑戦」(日経サイエンス別冊)、ならびに「フロントランナー 挑戦する科学者」(日本経済新聞出版社)で紹介。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

河野 行雄 (Kawano Yukio)

東京工業大学 量子ナノエレクトロニクス研究センター 准教授

研究者番号：90334250

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：