

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 26 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26286005

研究課題名(和文) テラヘルツエバネッセント光のナノ空間制御と量子伝導研究への応用

研究課題名(英文) Nanoscale control of terahertz evanescent waves and its application to study on quantum transport

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) 12,100,000円

研究成果の概要(和文)：テラヘルツ(THz)電磁波を用いた技術は、物質科学や生命科学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。本研究は、THzエバネッセント波を、サブ波長空間で制御する技術を開発し、新たなナノ物性研究へ応用することを目的として行われた。半導体微小センサをスキャンするシステムにより、半導体デバイスの電極からの電子注入に伴うTHz発光近接場分布の可視化に成功した。また、シリコン3次元構造と金属膜とのハイブリッド構造を作製することで、サブ波長空間における高いTHz電界増強効果ならびに極微小な試料のTHzセンシングを達成した。

研究成果の概要(英文)：Terahertz (THz) technologies are expected to be powerfully utilized in a variety of fields including materials science and life science. This research is aimed at the development of nanoscale control of THz evanescent waves and its application to study on nanoscale condensed matter physics. By scanning a nanoscale semiconductor sensor, we have successfully visualized THz radiation associated with electron injection into a semiconductor device. Furthermore, the development of a hybrid of a three-dimensional silicon structure and a metallic film has led to a strong enhancement in THz electric field in a sub-wavelength region and highly sensitive THz sensing of tiny samples.

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) 電磁波を用いた技術は、物質科学や生命科学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、THz 周波数帯は、エレクトロニクスを駆使した電子制御の高周波の際であり、オプティクスやフォトンクスを駆使した光制御の低 (光子) エネルギーの際でもある。そのため、他帯域に比べ発展が遅れている。しかしながら、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。THz 計測の物性研究応用は興味深いにもかかわらず、発展途上である。

2. 研究の目的

本研究は、THz 波のエバネッセント光をサブ波長空間で空間制御する技術を開発し、このイメージング技術を基にした新たなナノ物性研究の開拓と実証を行う。本研究により、これまで波長の長さが阻害していた、サブ波長領域での THz 物性の開拓が期待できる。

3. 研究の方法

(1) プラズモニック構造の作製と性能評価

THz 電場の増強をもたらすプラズモニック構造を作製する。電磁界シミュレーションと測定の両面から、最適なプラズモニック構造の形状を決定する。

(2) THz ナノスコーピーによる量子伝導研究

半導体における THz 発光について、関係する THz 励起キャリア伝導を探求する。

4. 研究成果

半導体微小センサをスキャンするシステムにより、THz エバネッセント光を直接的に検知し、画像計測する手法を開発した。従来の他技術のほとんどは、微小光源をスキャンする手法だが、本技術は微小センサをスキャンする「コレクションモード型」である。この特徴を用いることで、半導体デバイスの電極からの電子注入に伴う近接場 THz 発光分布の可視化を達成した。これは、デバイスに電流を流しただけの状況下における純粋な電子伝導状態をプロービングした観測結果である。以上の結果から、THz ナノイメージングが、固体デバイス中の電子の挙動を非接触で可視化する強力な手段として活用できる

ことを実証した。

THz ナノスケール計測をさらに発展させる上で重要な研究項目の1つが、THz 電界のさらなる局所集中効果である。この目的のため、高純度シリコンの3次元構造と金属膜とのハイブリッド構造を作製することで、サブ波長空間における高い THz 電界増強効果 (プラズモニック構造の有無に対して 130 万倍) を達成した。これにより、通常の Far-field 測定では検出できないほどの極微小な試料の THz 吸収スペクトルを観測することに成功した。また、高い誘電率の効果として、構造サイズを約 10 分の 1 にまで縮小することができた。

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 11 件)

- [1] Xiaowei He, Naoki Fujimura, J. Meagan Lloyd, Kristopher J. Erickson, 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, 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] 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
- [5] Y. Kawano, "Chip-Based Near-Field Terahertz Microscopy", *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology* **6**, 356-364 (2016). (Invited paper) 査読有り
- [6] 河野 行雄, 瀧田 佑馬, "THz 分光測定のコツ", 「応用物理」基礎講座, Vol. 85, pp. 428-432 (2016) 査読なし
- [7] 河野 行雄, "チップ型近接場テラヘルツ分光イメージャーと量子伝導研究への応用",

- 「表面科学」37, 586-592 (2016). 査読有り
- [8] Xiangying Deng, Shunri Oda, and Yukio Kawano, “Frequency Selective, High Transmission Spiral Terahertz Plasmonic Antennas”, Journal of Modeling and Simulation of Antennas and Propagation 2, 1-6 (2016). 査読有り
- [9] Iguchi Takashi, Ihara Satoshi, Shunri Oda and Yukio Kawano, “Thickness dependence of Terahertz Plasmonic Antenna”, Proceedings of 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves 2016 査読有り
- [10] X. Deng, S. Oda, and Y. Kawano, “Split-joint bull’s eye structure with aperture optimization for multi-frequency terahertz plasmonic antennas”, Proceedings of 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves 2016 査読有り
- [11] T. Iguchi, T. Sugaya, and Y. Kawano, “Silicon-immersed terahertz plasmonic structures”, Applied Physics Letters 110, 151105-1-4 (2017). 査読有り
- [学会発表] (計 32 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)**
- [21] 河野 行雄, “チップ型近接場テラヘルツ波イメージングとその応用”、SIMS 研究会 ALC15 サテライトチュートリアル「SIMSと関連技術による化学イメージング」(成蹊大学、2016年8月) **(招待講演)**
- [22] 河野 行雄, “ナノカーボン材料を利用したテラヘルツ波検出・イメージング:物性研究から産業・医療応用まで”、新学術領域研究ハイブリッド量子科学・若手研究会 (東京理科大学、2016年8月) **(招待講演)**
- [23] Y. Kawano, “Nanoscale Terahertz Sensing and Imaging with Graphene and Arrayed Carbon Nanotubes”, 4th Advanced Electromagnetics Symposium (Malaga, Spain, July 2016). **(Invited)**
- [24] Y. Kawano, “Near-field frequency-selective terahertz imaging utilizing graphene and carbon nanotubes”, SPIE DCS (Baltimore, MD, United States, April 2016). **(Invited)**
- [25] 鈴木 大地, 小田 俊理, 河野 行雄, 光熱起電力を用いたテラヘルツ帯検出器の熱解析及びイメージング応用, 第77回応用物理学会秋季学術講演会 (2016年9月13日–9月16日)
- [26] 落合 雄輝, 鈴木 大地, 小田 俊理, 河野 行雄, 単層カーボンナノチューブフィルムを用いたテラヘルツ波検出器における熱電効果の向上, 第77回応用物理学会秋季学術講演会 (2016年9月13日–9月16日)
- [27] Juxian Li, Daichi Suzuki, Shunri Oda, Yoshikazu Ito, Takeshi Fujita, and Yukio Kawano, A nanoporous graphene terahertz detector, The 51st Fullerenes–Nanotubes–Graphene General Symposium (51st FNTG) (Sep. 7– Sep. 9, 2016), Hokkaido, Japan.
- [28] Daichi Suzuki, Shunri Oda, and Yukio Kawano, Demonstration of terahertz sensing and imaging with carbon nanotube devices, 17th International Conference on the Science and Application of Nanotubes

(NT16) (Aug. 7- Aug. 13, 2016), Wien, Austria.

- [29] Daichi Suzuki, Shunri Oda, and Yukio Kawano, Photothermoelectric properties of carbon nanotubes terahertz imagers and inspection applications, The 51st Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium (51st FNTG) (Sep. 7- Sep. 9, 2016), Hokkaido, Japan.
- [30] Iguchi Takashi, Ihara Satoshi, Shunri Oda and Yukio Kawano, Thickness dependence of Terahertz Plasmonic Antenna, 41st International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2016) (Sep. 25- Sep. 30, 2016), Copenhagen, Denmark.
- [31] Daichi Suzuki, Shunri Oda, and Yukio Kawano, Mechanism of Carbon Nanotubes Terahertz Detectors Based on Photothermoelectric Effect, 41st International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2016) (Sep. 25- Sep. 30, 2016), Copenhagen, Denmark.
- [32] X. Deng, S. Oda, and Y. Kawano, Split-joint Bull's Eye Structure with Aperture Optimization for Multi-frequency Terahertz Plasmonic Antennas, 41st International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2016) (Sep. 25- Sep. 30, 2016), Copenhagen, Denmark.

〔図書〕 (計 1 件)

- [1] 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.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 2 件)

- [1] 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: 特許権

番号: 特願 2015-244218,
PCT/JP2016/087196

出願年月日: 2015 年 12 月 15 日 (PCT 出
願日: 2016 年 12 月 14 日)

国内外の別: 国内

- [2] 名称: プラズモニックアンテナ、プラズモニックアンテナの製造方法および検出装置
発明者: 河野行雄、シャイン デング、井口 崇
権利者: 東京工業大学
種類: 特許権
番号: 特願 2016-153599
出願年月日: 2016 年 8 月 4 日
国内外の別: 国内

○取得状況 (計 1 件)

- [1] 名称: 電界効果トランジスタ
発明者: 河野行雄
権利者: 東京工業大学
種類: 特許権
番号: 5943411
取得年月日: 2016 年 6 月 3 日
国内外の別: 国内

〔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, 第 30 回
先端技術大賞受賞・ニッポン放送賞 (2016
年) など計 5 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。

「科学立国 日本を築く PartII 次代を拓く
気鋭の研究者たち」(日刊工業新聞社) で研究紹介 『「テラヘルツ波」で目に見えない物

を見る～物質・生命・宇宙の先端科学から産業・医療応用まで～』 (2017年3月出版)

6. 研究組織

(1) 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 未来産業技術研究所 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：

(4) 研究協力者

()