

令和 6 年 6 月 27 日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01746

研究課題名（和文）テラヘルツ・赤外光電場の3次元制御と階層的トポロジーを持つ物質のナノスケール分析

研究課題名（英文）Three-dimensional control of terahertz and infrared electric fields and nanoscale analysis of materials with hierarchical topology

研究代表者

河野 行雄（Kawano, Yukio）

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：90334250

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：テラヘルツ（THz）～赤外領域の光計測技術は、様々な物質材料を研究するための有効なツールとなっている。ところが、一般的に光学イメージングの空間分解能は波長程度に制限されるため、光の中では波長の長いTHz・赤外光による画像化には空間分解能が低いという課題がある。本研究では、独自の集光素子を作製することで、この問題を克服し、物質材料のミクロなTHz・赤外光物性の解明につなげた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光による計測は主に可視光や近赤外光を中心として発展してきたため、より波長の長い領域の光学イメージングにおいて波長による制限を超える空間分解能が得られたことは、今後の光計測に拡張をもたらす意義がある。さらに本研究では、光の振動方向を変えながら画像化することが可能となったため、特徴的な構造を持つ物質材料の分析に有効である。

研究成果の概要（英文）：Terahertz (THz) and infrared (IR) measurements have become an effective tool for studying various materials. However, since the spatial resolution of optical imaging is mainly limited to the wavelength, imaging technologies with THz and IR light, which have longer wavelengths in light, have the problem of low spatial resolution. In this study, we have overcome this problem by fabricating unique light focusing devices, which have led to the elucidation of microscopic THz and IR optical properties of materials.

研究分野：テラヘルツ・光工学

キーワード：テラヘルツ光 赤外光

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ (THz) ~ 赤外光の光子エネルギーは、様々な分子の振動や分子間相互作用、固体結晶中電子や格子の振動に対応する重要な領域であるため、THz・赤外計測はこれらを探求する強力なツールとしての期待が高い。ところが、光の中では波長が非常に長いため、画像化計測の空間分解能が光の波長程度に制限される回折限界の問題が顕在化する。また、計測の対象となる物質・分子科学の点からは、近年、材料やデバイスの幾何学的な性質が物性や機能に大きく関係することが見出されており、それぞれの特徴に応じた THz・赤外分析が求められている。以上から、サブ波長領域の THz・赤外物性研究は発展途上であるものの、大変興味深いテーマである。

2. 研究の目的

本研究は、THz・赤外光の分布を、サブ波長分解能、周波数可変でベクトルイメージングする技術を実現し、特徴的な階層的トポロジーを持つ物質へ適用することを目的とする。具体的には、光を局所的に捉えるサブ波長構造部における THz・赤外光電場の集中をさらに高めるため、構造設計による光電場の絞り込み、かつ光電場方向の選択的な制御を可能にする。特徴的なトポロジーを持つ材料や構造体のサブ波長分析への応用として、カーボン、半導体、高分子材料を主な対象として、上記計測法による階層的顕微観測の結果と材料の機能・性能との関係について明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 集光素子の空間変調

サブ波長域増強光電場のサイズ・軸方向を制御し、新奇な超回折限界光プローバーとして機能させる。

(2) 計測システムの構築

外部の振動に対する対策、高精度なポジショニング等の工夫を加えることで、サブ波長 THz・赤外光計測のための実験システムを構築する。

(3) 物質材料研究応用

(1)、(2)に基づき、特徴的な幾何学構造を持つ高分子や半導体材料、カーボン材料等へ適用する。実験結果から、赤外・THz 帯の低エネルギー励起状態における電荷や格子のミクロなダイナミクスの理解を深める。

4. 研究成果

サブ波長集光部における光電場の集中をさらに高めるため、クリーンルーム内でのリソグラフィを用いて 3 次元的な構造を作製した。ここで、① 2 つの光学共鳴を重畳させることによる、新たな光増強、② 偏光の自由度を制御可能という 2 種類の構造体を示し、電磁界シミュレーション並びに分光・イメージング測定からその性能を確認した。また、軸方向選択的な光検出が可能な新奇な構造体を提案し、光電場の方向を識別して画像化できることを、電磁界シミュレーションと実験双方により示した。

以上の構造体を超回折限界光プローブとして機能させ、サブ波長光学イメージングが可能な計測システムを構築した。振動対策を施したり、光学的アライメントの精度を上げたりすることで、低ノイズ下での測定が可能となり、十分な信号雑音比を得ることができた。

上記のシステムを用いて、半導体、カーボン、高分子材料のマイクロな特性に関する研究を行った。光照射による固体中素励起ダイナミクスの方角選択的可視化、高分子の幾何学的特徴をもたらす化学結合や高次構造の解明等の成果が得られた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Araki Teppei, Li Kou, Suzuki Daichi, Abe Takaaki, Kawabata Rei, Uemura Takafumi, Izumi Shintaro, Tsuruta Shuichi, Terasaki Nao, Kawano Yukio, Sekitani Tsuyoshi	4. 巻 36
2. 論文標題 Broadband Photodetectors and Imagers in Stretchable Electronics Packaging	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Advanced Materials	6. 最初と最後の頁 2304048
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/adma.202304048	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Rei Kawabata, Kou Li, Teppei Araki, Mihoko Akiyama, Kaho Sugimachi, Nozomi Matsuoka, Norika Takahashi, Daiki Sakai, Yuto Matsuzaki, Ryo Koshimizu, Minami Yamamoto, Leo Takai, Ryoga Odawara, Takaaki Abe, Shintaro Izumi, Naoko Kurihira, Takafumi Uemura, Yukio Kawano, Tsuyoshi Sekitani	4. 巻 36
2. 論文標題 Ultraflexible Wireless Imager Integrated with Organic Circuits for Broadband Infrared Thermal Analysis	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Advanced Materials	6. 最初と最後の頁 2309864
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/adma.202309864	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Xiangying Deng, Shunri Oda, Yukio Kawano	4. 巻 62
2. 論文標題 Graphene-based midinfrared photodetector with bull's eye plasmonic antenna	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Optical Engineering	6. 最初と最後の頁 97102
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/1.OE.62.9.097102	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 K. Li, Y. Matsuzaki, S. Takahara, D. Sakai, Y. Aoshima, N. Takahashi, M. Yamamoto, Y. Kawano	4. 巻 10
2. 論文標題 All-Screen-Coatable Photo-Thermoelectric Imagers for Physical and Thermal Durability Enhancement	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advanced Materials Interfaces	6. 最初と最後の頁 2300528
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/admi.202300528	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 K. Li, T. Araki, R. Utaki, Y. Tokumoto, M. Sun, S. Yasui, N. Kurihira, Y. Kasai, D. Suzuki, R. Marteiijn, J. D. Toonder, T. Sekitani, and Y. Kawano	4. 巻 8
2. 論文標題 Stretchable broadband photo-sensor sheets for nonsampling, source-free, and label-free chemical monitoring by simple deformable wrapping	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eabm4349
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.abm4349	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 D. Suzuki, Y. Takida, Y. Kawano, H. Minamide, N. Terasaki	4. 巻 23
2. 論文標題 Carbon nanotube-based, serially connected terahertz sensor with enhanced thermal and optical efficiencies	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Science and Technology of Advanced Materials	6. 最初と最後の頁 424-433
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/14686996.2022.2090855	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 酒井大揮, 木下祐哉, 李恒, 河野行雄	4. 巻 21
2. 論文標題 カーボンナノ材料のテラヘルツ検出・撮像デバイスへの応用	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 月刊MATERIAL STAGE	6. 最初と最後の頁 37-44
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kou Li, Ryoichi Yuasa, Ryogo Utaki, Meiling Sun, Daichi Suzuki, and Yukio Kawano	4. 巻 12
2. 論文標題 Robot-assisted, source-camera-coupled multi-view broadband imagers for ubiquitous sensing platform	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 3009-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-021-23089-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 河野行雄	4. 巻 90
2. 論文標題 カーボンナノチューブの光・熱物性制御によるフレキシブル全方位テラヘルツ撮像検査チップ	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 応用物理 (応用物理学会誌)	6. 最初と最後の頁 303-307
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11470/oubutsu.90.5_303	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計21件 (うち招待講演 12件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 河野行雄
2. 発表標題 シート状テラヘルツ・赤外撮像センサと非破壊マルチビュー画像検査応用
3. 学会等名 日本光学会 光設計研究グループ 第 75 回研究会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 河野行雄
2. 発表標題 Flexible and Stretchable Terahertz/Infrared Imagers for Multi-View Visualization and Inspection
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Shirahata, A. Oi, S. Hashiyada, Y. Kawano
2. 発表標題 Near-field hyper-spectral imaging of surface phonon polaritons in quartz
3. 学会等名 The 31st International Conference on Photochemistry (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Shirahata, A. Oi, S. Hashiyada, Y. Kawano
2. 発表標題 Characterizing surface phonon polaritons in quartz by near-field microscopy
3. 学会等名 2023 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 西山 黎, ファム ナム ハイ, 橋谷田 俊, 河野 行雄
2. 発表標題 トポロジカル絶縁体BiSbのテラヘルツ吸収特性
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小西優一, 西山黎, 橋谷田俊, 河野行雄
2. 発表標題 テラヘルツ円偏光場生成に向けた円形開口を有するアルキメデスの螺旋型サブ波長構造体の設計
3. 学会等名 第32回日本赤外線学会研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小西優一, 西山黎, 橋谷田俊, 河野行雄
2. 発表標題 円形開口を有するアルキメデスの螺旋構造を用いたテラヘルツ局在円偏光場生成
3. 学会等名 第71回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 白幡 香太郎, 瀬崎 達也, 橋谷田 俊, 河野 行雄
2. 発表標題 近接場光学顕微鏡による表面フォノンポラリトンの異方性の観測
3. 学会等名 第71回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 河野行雄
2. 発表標題 シート状広帯域テラヘルツ・赤外撮像センサと全方位検査分析応用
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Kawano
2. 発表標題 A Flexible and Stretchable Terahertz Imaging Sheet for Multi-View Visualization
3. 学会等名 29th International Display Workshops (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 河野行雄
2. 発表標題 シート状ブロードバンド撮像センサと検査分析応用～テラヘルツ光から可視光まで～
3. 学会等名 2022年度第2回プリントド・エレクトロニクス研究会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Li, T. Araki, T. Sekitani, Y. Kawano
2. 発表標題 A mechanically stretchable and optically broadband imager sheet
3. 学会等名 8th International Workshop on Nanocarbon Photonics and Optoelectronics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 河野行雄
2. 発表標題 カーボンナノチューブ膜型フレキシブルテラヘルツ波撮像シートカメラ
3. 学会等名 2022年度日本写真学会オンライン年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 河野行雄
2. 発表標題 シート状ブロードバンドイメージャーと非破壊検査分析応用 ~テラヘルツ光から可視光まで~
3. 学会等名 第28回画像センシングシンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Kawano
2. 発表標題 A flexible terahertz imaging sheet for multi-view visualization and inspection
3. 学会等名 12th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Kawano
2. 発表標題 Making the Invisible Visible with Terahertz: The Last Frontier of the Electromagnetic Wave
3. 学会等名 Innovation Harbour Lectures (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西山黎, 菅谷俊夫, 河野行雄
2. 発表標題 サブ波長領域でのセンシングに向けた固浸法テラヘルツ帯ブルズアイ構造体の3Dアパチャー形状
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kou Li, Yukio Kawano
2. 発表標題 Chemically-enriched and integrated carbon nanotube photo-thermoelectric scanners for non-sampling, source and label-free chemical monitoring
3. 学会等名 第61回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kou Li, Yukio Kawano
2. 発表標題 Freely attachable broadband camera sheet based on series photo-thermoelectric coupling structure
3. 学会等名 1st Japan-France Virtual Workshop on Thermoelectrics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河野 行雄
2. 発表標題 カーボンナノチューブによるシート状フレキシブルテラヘルツ帯イメージャーと 検査分析応用
3. 学会等名 テラヘルツ材料セミナー（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Kawano
2. 発表標題 A carbon nanotube terahertz camera patch sheet for multi-view imaging
3. 学会等名 5th International Caparica Symposium on Nanoparticles/Nanomaterials and Applications 2022（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年～2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------