

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17476

研究課題名(和文) テラヘルツカメラを用いたリアルタイムイメージング分光計測法の開拓

研究課題名(英文) Real-time imaging spectroscopy with Terahertz camera

研究代表者

神田 夏輝 (Kanda, Natsuki)

国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究領域・研究員

研究者番号：60631778

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：テラヘルツ周波数領域には多くの物質が特徴的なスペクトルを持つため、テラヘルツ分光イメージングは幅広い応用が期待されているが、計測のリアルタイム性に欠けることが障害となっていた。本研究では、マルチチャンネル性・リアルタイム性を兼ね備えた最先端のテラヘルツ検出器であるテラヘルツカメラを用い、回折格子型分光器を作製してイメージング分光を行うことで、データ取得効率の良い新たなテラヘルツ分光計測法を開拓した。今後のテラヘルツ光源の高強度化やテラヘルツカメラの高感度化により、本手法は物性分野だけでなくバイオ分野や、安全保障、製品検査などの産業応用へも広がると予想される。

研究成果の概要(英文)：Terahertz spectroscopic imaging has a strong potential for applications because many molecules have fingerprint spectra in this frequency region. However, the performance of conventional techniques is restricted by the requirement of multidimensional scanning, which implies an image data acquisition time of several minutes.

In this research, we proposed and demonstrated a novel broadband THz spectroscopic imaging method that enables real-time image acquisition using a high-sensitivity uncooled THz camera. By exploiting the two-dimensionality of the detector, a broadband multi-channel spectrometer near 1 THz was constructed. By this method, molecule-specific distributions in one-dimensional space can be determined at a fast video rate (15 frames per second), and two-dimensional molecule-specific images can be obtained in only a few seconds. Our method can be applied in various important fields such as biomedicine and security.

研究分野：テラヘルツ分光、超高速レーザー

キーワード：テラヘルツ分光 イメージング

1. 研究開始当初の背景

周波数が 0.1 ~ 10THz 程度の電磁波はテラヘルツ電磁波と呼ばれている。この周波数領域は分子間振動や回転振動などの周波数に対応しており、多くの生体分子や気体分子などの指紋スペクトル領域となっている。そのため、テラヘルツ電磁波で分光を行うことで、非接触かつラベルフリーに物質を識別することが可能となる。また、テラヘルツ波は可視光と大きく異なる透過特性を示すことから、テラヘルツ波を用いたイメージングは可視光での識別が困難な分子識別イメージングや、物性研究においても強力なツールとなる。

しかしながら、スペクトル情報を含んだイメージング(分光イメージング)を行うためには1枚の画像取得に数十秒から数分の時間がかかることが一般的だった。これは、従来のテラヘルツ波の検出方法では検出器が単一素子であるために、周波数と空間の多次元的なスキャンが必要であったためである。

一方で、近年の赤外用ポロメーターアレイの改良により、テラヘルツ電磁波に対して感度を持つ室温動作のカメラが開発された。我々も NEC 社と共同でこのカメラの高感度化の研究を行い、1THz 周辺の低周波域での大幅な感度向上に成功している。このような素子の登場により、リアルタイムなテラヘルツイメージングが可能となってきた。

2. 研究の目的

本研究では、マルチチャンネル性・リアルタイム性を兼ね備えた最先端のテラヘルツ検出器であるテラヘルツカメラを用い、従来手法では不可能だった多次元的な新たな分光計測法の開拓を目的とした。

3. 研究の方法

本研究では新たなテラヘルツ分光計測法として、高感度テラヘルツカメラを用いた回折格子型テラヘルツ分光装置の作製を行った。NEC 社のカメラは 320 × 240 画素というマルチチャンネル性と、ビデオレート動作(30 フレーム/秒)というリアルタイム性を有している。可視光領域でカメラのようなアレイ検出器が分光計測におけるデータ取得効率を大幅に改善したように、テラヘルツ領域でもテラヘルツカメラは分光計測で強力なツールになる。このカメラの検出器としての多次元性を利用することで、分光とイメージングを同時に行うような新しいテラヘルツ分光計測法が実現できると考えた。

4. 研究成果

(1) テラヘルツマルチチャンネル分光器の作製

テラヘルツ波を分光するための反射型回折格子を作製し、テラヘルツカメラを検出器とした 1THz 近傍の広帯域なマルチチャンネル分光器を作製した。テラヘルツ光源にはこの

周波数領域を含む高強度広帯域光源である、LiNbO₃ 結晶をパルス面傾斜法で励起して得られるテラヘルツパルスを使用した。

回折格子により周波数ごとに分解されたテラヘルツ波をテラヘルツカメラに結像することで、ビデオレートでテラヘルツのスペクトル情報を得ることに成功した。大気中の水蒸気の吸収スペクトルを測定することで、分光器の周波数校正を行った。1.3 ~ 2.1THz の範囲で、周波数分解能 20 ~ 70GHz を実現した。

(2) テラヘルツカメラを用いたテラヘルツ分光イメージング

前述のテラヘルツマルチチャンネル分光器においては、カメラの水平方向の次元はテラヘルツの周波数情報に割り当てられていたが、鉛直方向の次元は積分してしまっていたため利用できていなかった。ここで、テラヘルツカメラの検出素子には分光器入射スリット位置の像が結ばれていることに着目し、イメージング分光への展開を行った。分光器入り口への集光をシリンドリカルレンズにより線状の集光に変更することで、カメラの横方向を周波数情報に、縦方向を空間情報に対応させた(図 1)。これにより、カメラの多次元性を生かした分光測定を可能にした。

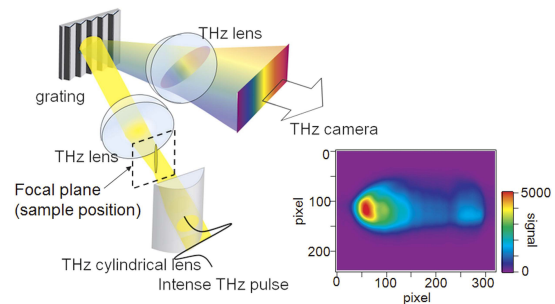


図 1: テラヘルツイメージング分光の概念図

実証実験として、2 種類の糖の粉末の空間分布のイメージングを行った。イメージング分光により図 2 のようなデータが得られる。図 2 の上下はラクトースのみ、フルクトースのみの試料で、中央はラクトースとフルクトースが空間的のドメインを形成している試料である。スペクトルの違いにより物質を識別できており、混合試料ではドメイン境界が確認できる。

さらに、テラヘルツ領域の指紋スペクトルを元に独立成分分析を行うことで、各成分の空間分布を決定した。データ取得及び解析はビデオレートで処理が可能である。テラヘルツ波が照射されている縦長の領域(1次元空間)において各物質の分布をリアルタイムに決定することができた。

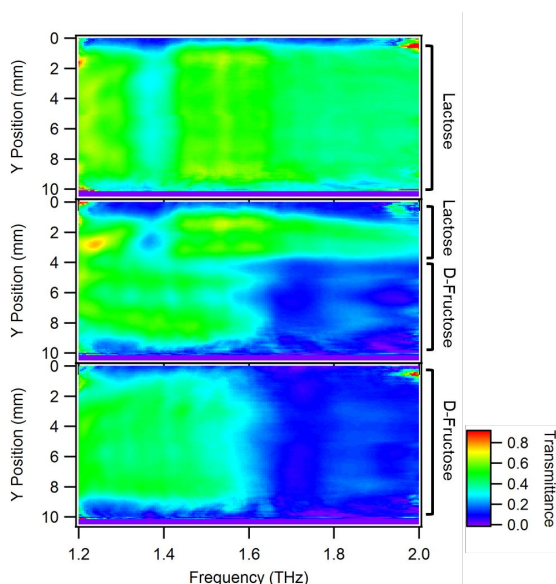


図 2：イメージ分光の測定結果

短冊状の領域において各物質の空間分布がリアルタイムで得られるので、試料を一次的にスキャンしてこれらをつなぐことで、10 秒程度で二次元分光像を取得できた。図 3 のように、テスト試料においてラクトースとフルクトースの空間分布を測定することができた。

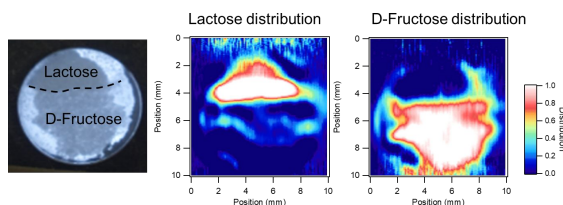


図 3：テスト試料の光学写真（左）と、テラヘルツ分光イメージングにより測定されたラクトース及びフルクトースの空間分布（右）

本手法では、テラヘルツカメラによる平均パワーの検出を行っているため、光源のコヒーレンスは重要ではない。そのため、今後のテラヘルツ光源の高強度化やテラヘルツカメラの高感度化により、より簡便に適用できる手法になると期待できる。また、本研究で実証したテラヘルツカメラの多次元性を利用した分光計測は、各次元の割り振りを変えることにより、分光イメージングだけでなく偏光計測やポンププローブ分光などへも応用が可能である。そのため、本研究成果は物性分野だけでなくバイオ、化学分野などの基礎研究や、セキュリティー、製品検査などの産業応用へも広がると期待している。

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 2 件)

Natsuki Kanda, Kuniaki Konishi,

Natsuki Nemoto, Katsumi Midorikawa, Makoto Kuwata-Gonokami, “Real-time broadband terahertz spectroscopic imaging by using a high-sensitivity terahertz camera,” *Sci. Rep.* **7**, 42540 (2017). (査読あり)

N. Nemoto, N. Kanda, R. Imai, K. Konishi, M. Miyoshi, S. Kurashina, T. Sasaki, N. Oda, and M. Kuwata-Gonokami, “High-sensitivity and broadband, real-time terahertz camera incorporating micro-bolometer array with resonant cavity structure,” *IEEE Trans. THz Sci. Technol.*, **6**, 175-182 (2016). (査読あり)

〔学会発表〕(計 3 件)

Natsuki Kanda, Kuniaki Konishi, Natsuki Nemoto, Katsumi Midorikawa, and Makoto Kuwata-Gonokami, “Spectroscopic imaging with a high-sensitivity uncooled terahertz camera,” EMN Meeting on Terahertz 2017, **22**, Honolulu, USA, (3 April, 2017) (Oral presentation, invited).

神田夏輝「高感度テラヘルツカメラによるテラヘルツ分光イメージング」第8回テラテクビジネスセミナー、パシフィコ横浜、2016年9月14日（招待講演、口頭発表）

神田夏輝、小西邦昭、根本夏紀、緑川克美、五神真、「高感度テラヘルツカメラを用いたテラヘルツ分光イメージング」テラヘルツ応用システム研究会「テラヘルツ周波数帯近傍の電磁波・光を用いたバイオ応用と関連技術」理化学研究所和光、2016年2月5日（口頭発表）

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

神田 夏輝 (KANDA, Natsuki)
国立研究開発法人理化学研究所・光量子工
学研究領域・研究員
研究者番号：60631778

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

緑川 克美 (MIDORIKAWA, Katsumi)
国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学
研究領域・領域長

五神 真 (GONOKAMI, Makoto)
東京大学・総長

小西 邦昭 (KONISHI, Kuniaki)
東京大学・理学系研究科・助教

根本 夏紀 (NEMOTO, Natsuki)
東京大学・理学系研究科・博士課程学生