

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔平成28年度研究進捗評価用〕

平成25年度採択分
平成28年3月12日現在

超高感度テラヘルツヘテロダインCTおよび分光イメージングの実現

Highly sensitive terahertz heterodyne CT
and spectroscopic imaging

課題番号：25220606

川瀬 晃道 (Kawase Kodo)

名古屋大学・大学院工学研究科・教授



研究の概要

我々は、出力50kW、ダイナミックレンジ10桁という優れた性能を有する光注入型テラヘルツパラメトリック発生検出システムの開発に成功した。本研究では、この新方式の長所を活かした透過型テラヘルツ3D-CTおよび分光イメージングを実現し、製品内部の欠陥検査、厚手の郵便物内に隠された禁止薬物検出などを超高感度で実現することを目的とする。

研究分野：テラヘルツ工学

キーワード：テラヘルツ波、非線形光学、パラメトリック発生、イメージング

1. 研究開始当初の背景

我々は最近、ダイナミックレンジ10桁(SN比10桁)という優れた性能を有する光注入型テラヘルツパラメトリック発生検出システムの開発に成功した。さらにこのシステムの検出方式はコヒーレントなテラヘルツ波のみに感度を有するため、測定ターゲット中を直線的に透過した成分のみを計測し、散乱光は計測しないという、理想的な高精細イメージングが可能となる。

2. 研究の目的

本研究では、この新方式の長所を活用した透過型CTおよび分光イメージングを実現し、例えば、プラスチック製品やセラミクス製品内部の欠陥検査、厚手の郵便物内に隠された禁止薬物検出、製薬工場でのロットミス検出などの社会的ニーズに応え得る非破壊検査システムを、超高感度で実現することを目的とする。

3. 研究の方法

研究期間内に明らかにする項目は、①光注入型テラヘルツパラメトリック発生検出システムを用いた超高感度テラヘルツ分光イメージングシステムの実現 ②光注入型テラヘルツパラメトリック発生検出システムを用いた超高感度テラヘルツヘテロダインCTシステムの実現 ③光注入型テラヘルツパラメトリック発生検出システムの1THz以下の低周波域への拡大、および④上記システ

ムの各種応用に対する実用性能評価および基盤技術の醸成、である。

項目③は、理化学研究所が担当し、1THz以下の領域における光注入型テラヘルツパラメトリック発生器の開発を目的としている。1THz以下の帯域では、紙、ビニール、プラスチック、セラミクス、衣類、試薬、錠剤、など本研究で対象とする測定ターゲット中に含まれる様々な物質の透過率が高くなる。

4. これまでの成果

我々は2003年に世界初のテラヘルツ波を用いた分光イメージングシステムの開発を報告した(Opt. Exp. 11, 2549)。その報告で用いていたTHz Parametric Oscillator (TPO)はダイナミックレンジが4桁以下であり、薄手の封筒越しでのみ分光イメージングによる各試薬の識別が可能であった。今回の我々の研究によって、光注入型THz波パラメトリック発生及び検出を用いたテラヘルツ分光イメージングシステムの大幅な高出力化と高感度化に成功し、TPOよりも遙かに高い100dBものダイナミックレンジを得ることができた。そのシステムを用いた分光イメージングシステムを構築し、分厚い遮蔽物越しでの試薬の識別に世界に先駆けて成功した。

本研究で用いたサンプルは、マルトース、グルコース、フルクトースの3種類の試薬粉末をプラスチック製の袋(10×10mm)に封入し、厚紙のEMS封筒2枚、段ボール2枚、気泡緩衝材4枚で遮蔽した。このときのサンプルの厚さは約23mmであり、2003年の報告で

用いた約 0.1mm の薄い封筒よりも格段に分厚い遮蔽となり、実用的にも十分である。次に、テラヘルツ波の周波数を 1.4~1.9THz の範囲で変化させ、12 枚のマルチスペクトル画像を測定し、予め測定した各試薬の指紋スペクトルを用いて、主成分分析法により、各試薬の空間分布と濃度の抽出に成功した。

他方、光注入型 THz 波パラメトリック発生検出システム (is-TPG) を用いて 3D-CT システムの構築及び、ソフトマテリアルのサンプルの CT 画像計測を行った。is-TPG により発生したテラヘルツ波を焦点距離 100 mm のレンズを用いてサンプルに集光し、透過光は検出用の LiNbO₃ 結晶で赤外光に変換し計測した。測定サンプルは θ 軸、X 軸、 χ 軸の 3 軸をステージ制御し 3D-CT 画像を取得した。実際に目視では確認できないプラスチック製品内部の構造欠陥を、非破壊かつ非接触で検知することに成功した。

5. 今後の計画

テラヘルツ分光イメージングシステムの構築を行い、厚さ約 20mm の遮蔽物下の試薬の画像抽出に成功したが、現在本システムのダイナミックレンジは最大で 8 桁程度であり、実用性を考えるとさらなる高ダイナミックレンジが望ましい。また、波長可変光源ゆえに波長掃引をする必要があり、測定時間が長く、高速化が課題である。

ダイナミックレンジ向上のためには、分光イメージングシステムの検出部のノイズ除去、及び高感度赤外光検出器の導入によりさらなる高感度化を目指す。測定時間の問題に関しては、テラヘルツ波の多波長同時発振化により波長掃引の時間を不要とし、1 パルスでの分光を実現することにより測定時間の大幅な短縮を目指す。また、高感度赤外光検出器としてフォトディテクタを導入することで感度向上が見込まれており、ダイナミックレンジ 10 桁を実現でき、さらに多波長発振化により測定時間を 1/10 程度まで短縮できると考えている。

3D-CT イメージングに関しては、工業製品に対する透過率向上を目指し、is-TPG 発振周波数域の低周波化を進め、CT システムへの導入を図る。また、イメージングの解像度を向上させるための光学系の再設計と画像処理プログラムの改良を行う。具体的には、レンズの設計の見直し、およびテラヘルツ波の屈折率や回折を補正するプログラム、さらにサンプルの輪郭を強調させるエッジ加工等の技術導入を図る。これらの改善により、分厚く、かつ構造が複雑なプラスチック・セラミックス等の工業製品の内部欠陥などを鮮明に可視化できると期待される。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

1. S. Tripathi, Y. Sugiyama, K. Murate, K. Imayama, K. Kawase, "Terahertz wave three-dimensional computed tomography based on injection-seeded terahertz wave parametric emitter and detector," *Optics Express* **24**, 6433 (2016).
2. M. Kato, S. R. Tripathi, K. Murate, K. Imayama, K. Kawase, "Non-destructive drug inspection in covering materials using a terahertz spectral imaging system with injection-seeded terahertz parametric generation and detection," *Optics Express* **24**, 6425 (2016).
3. K. Murate, Y. Taira, S. R. Tripathi, S. Hayashi, K. Nawata, H. Minamide, K. Kawase, "A high dynamic range and spectrally flat terahertz spectrometer based on optical parametric processes in LiNbO₃," *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology* **3**, Issue **4**, 523 (2014).
4. S. Hayashi, K. Nawata, T. Taira, J. Shikata, K. Kawase, H. Minamide, "Ultrabright continuously tunable terahertz-wave generation at room temperature," *Scientific Reports* **4**, Article number 5045 (2014). 他数報

受賞

1. K. Murate(名大院生), Best Poster Award, The 3rd International Symposium on Microwave/Terahertz Science and Applications (MTSA 2015), OIST, Okinawa, Japan (July 1-4, 2015), 受賞論文題目 "Development of widely tunable THz parametric source"
2. 村手宏輔(名大院生), 電子情報通信学会・電子デバイス研究会 学生発表奨励賞 (2016 年 1 月), 受賞題目「光注入型 THz パラメトリック発生器の周波数可変上限の拡大」
3. 林伸一郎, 理化学研究所研究奨励賞 (April 11, 2014) 受賞題目 "Development of 50kW peak power injection-seeded terahertz-wave generator".
4. 平祐介(名大院生), レーザー学会創立 40 周年記念第 34 回年次大会論文発表奨励賞 (2014 年 5 月 30 日), 受賞題目「非線形光学結晶を用いたテラヘルツ波増幅」
5. 平祐介(名大院生), 第 34 回応用物理学会講演奨励賞(2013 年 3 月), 受賞題目「LiNbO₃ 結晶を用いたテラヘルツ波のパラメトリック増幅」