

平成21年5月14日現在

研究種目：若手研究（A）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18686008
 研究課題名（和文） リアルタイム高機能テラヘルツ分光イメージング法の開発
 研究課題名（英文） Real-time terahertz spectroscopic imaging system
 研究代表者
 安井 武史（YASUI TAKESHI）
 大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教
 研究者番号：70314408

研究成果の概要：

テラヘルツ（THz）分光イメージングは、成分分析型の内部透視手段として各応用分野の利用が期待されているが、極めて長い測定時間が実用化への障害となっていた。本研究では、電気光学的時間-空間変換による実時間 THz 時間波形計測と線集光 THz 結像光学系による実時間 THz ラインイメージングを複合した THz カラーキャナースキナーの開発を行った。その結果、測定時間が従来法の 1/10,000 以下まで短縮され、世界で初めて動体サンプルの THz 分光イメージングに成功した。

交付額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2006年度 | 4,500,000 | 1,350,000 | 5,850,000 |
| 2007年度 | 14,700,000 | 4,410,000 | 19,110,000 |
| 2008年度 | 3,500,000 | 1,050,000 | 4,550,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 22,700,000 | 6,810,000 | 29,510,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 応用光学・量子光工学

キーワード：非破壊検査、フェムト秒レーザー、分光、テラヘルツ、非線形光学効果

1. 研究開始当初の背景

最近、科学技術立国再生に向けた国際競争力強化のため日本が今後10年以内に重点的に開発に取り組む『国家基幹技術10大戦略』が、文部科学省の諮問機関である科学技術・学術審議会から提示された。この内の1つとして、『電磁波のテラヘルツ波（THz波；波長 30 μ m ～ 3mm または周波数 0.1～10THz）による計測・分析技術』が取り上げられており、その狙い・効果には『THz波の透過性を生かした病理組織診断、郵便物内の麻薬・爆薬の識別』が挙げられている。こ

のような THz 計測分析技術の中核的計測手法として、THz 計測に特徴的な内部透視・分光・イメージングという3つの要素技術を複合した THz 分光イメージングがある。THz 分光イメージングでは、内部透視イメージを THz 周波数毎の色付きカラー画像（THz 分光画像）として測定し、特徴的な THz 指紋スペクトルと比較することにより成分分析イメージングが可能のため、従来の内部透視手段（X線、超音波他）に替わる非侵襲・非接触リモートな成分分析型内部透視イメージング手段（『どこに』『何が』あるかを見分

ける手段)として期待されている。

2. 研究の目的

これまでに THz 分光イメージングの有用性は研究室レベルで報告されているものの、基本的に点計測に基づいているため、時間遅延やサンプル移動といった複数の機械的走査機構に伴う長い測定時間(数十分~数時間以上)により測定対象が静止物体のみに制限され、産業応用分野における実用化が大きく制限されてきた。このような現状から、THz 分光イメージングの高速化が強く望まれている。従来研究では、機械的走査機構の高速化という観点から計測時間の短縮化が試みられているが、機械的走査機構に基づいている限りは、イメージング計測の完全なリアルタイム化は困難である。

ここで、THz 波の光としての並列処理性を上手く利用すると、機械的走査機構の省略による、THz 分光イメージングのリアルタイム化が実現できる。本研究では、電気光学的時間-空間変換と線集光 THz 結像光学系を複合した実時間 2次元時空間 THz イメージングを THz 分光イメージングに適用することにより、レーザー単一ショットでの計測が可能な THz カラーキャナーの開発を行う。

3. 研究の方法

2次元自由空間電気光学サンプリング法(2D-FSEOS)とは、THz ビームとプローブビーム(レーザービーム)を電気光学結晶に対して共軸に入射することにより、電気光学ポッケルス効果を通じて、THz ビームの空間電場分布をレーザービームの空間強度分布に変換する手法である。一方、非共軸 2D-FSEOS では、THz ビームとプローブビームを非共軸入射配置とすることにより、THz パルスの電場時間波形をプローブビームの空間強度分布に変換することが可能になる。測定原理を図 1 に示す。ここで、THz ビームはある時間遅延を有する正負の電場ピークから成る THz パルス信号とする。THz ビームとプローブビームは THz 波検出用の電気光学結晶にある交叉角で非共軸に入射される。THz パルス信号の 2つの波面(実線及び波線)とプローブビーム波面は、プローブビーム断面の空間的に異なる位置で重なる。ここで、THz ビームとプローブビームの伝搬速度がプローブビーム伝搬方向に関して等しいとすると、その波面の重なりは空間的に同じ位置を保ったまま電気光学結晶中を伝搬していくことになる。その結果、THz パルスの時間波形がプローブビーム断面の空間複屈折量分布に変換されることになる。偏光子ペアによって空間複屈折量分布から空間強度分布に変換された THz パルス波形情報は、結像レンズを介してラインセンサーによって検出される。

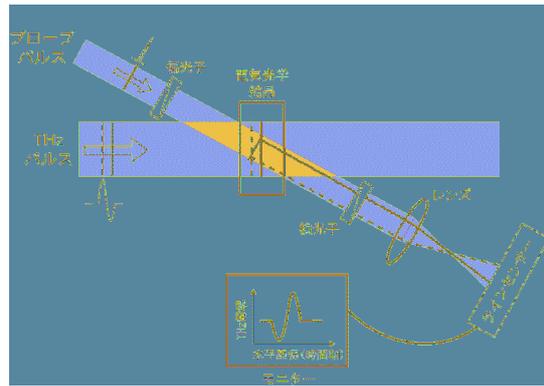


図 1 電気光学的時間-空間変換

実験装置図を図 2 に示す。フェムト秒チタン・サファイア再生増幅器からのレーザー光を ZnTe 結晶(ZnTe1)に入射することにより、高強度 THz パルスを発生させる。サンプルを透過した THz パルスとプローブパルスを THz 検出用 ZnTe 結晶(ZnTe2)に非共軸入射することにより、THz パルス電場の時間波形がプローブパルスの空間複屈折量分布に変換される(電気光学的時間-空間変換)。クロスニコル配置の偏光子ペア(P, A)によってプローブ光の空間強度分布に変換された THz パルス電場時間波形は、結像レンズ(L3)を介して高速 CMOS カメラの水平座標に展開される。一方、CMOS カメラの垂直座標は 1次元イメージングに利用可能であるので、円筒 THz レンズ(CL)を用いて THz ビームをサンプルに線集光し、それを THz レンズペア(L1, L2)で ZnTe2 に結像することにより、サンプルの 1次元 THz イメージを CMOS カメラの垂直座標に展開する。このように、水平座標に時間軸、垂直座標に空間軸が展開された 2次元時空間 THz イメージを、高速ロックイメージング検出する(500fps)。最終的に、2次元時空間 THz イメージの時間軸(水平座標)を高速フーリエ変換することにより、0.1~3THz を 29GHz ごとに分割した 110 枚の THz 分光ラインイメージを実時間で得る。本手法では、THz 線集光ラインを用い、一般のカラーキャナーと同じくラインの動き(または測定対象の動き)に合わせて実時間でラインイメージを測定するので、移動物体の 2次元 THz カラー画像の取得も可能になる。

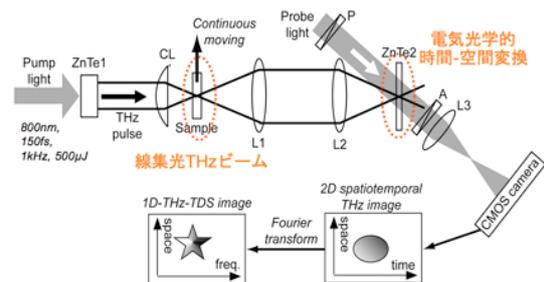


図 2 THz カラーキャナー装置

4. 研究成果

まず、テストサンプルとしてメタルホールアレイ (MHA) を用いて基本特性評価を行った。MHA は THz 帯フォトニック結晶の 1 つであり、空孔率を調節することにより、透過周波数が選択可能な THz 帯バンドパスフィルターとして利用できる。今回は、空間的に異なる透過特性を有する 4 分割 MHA (透過周波数 = 0.2THz, 0.4THz, 0.8THz, 1.6THz ; 図 3) を作成し、ステージで一方向に連続移動 (1mm/sec) させながら測定を行った (測定領域 20mm*20mm、測定時間 20 秒)。図 4 は、4 分割 MHA の 4 つの透過周波数における THz 分光画像 (232pixel*200pixel) を示しており、4 分割 MHA のスペクトル特性を反映した結果が得られているのが分かる。イメージのクロストークは、4 分割 MHA 自体の透過スペクトル特性によるものである。従来の点計測型 THz-TDS イメージング装置とピクセルレート (=総ピクセル数/測定時間) を比較すると、

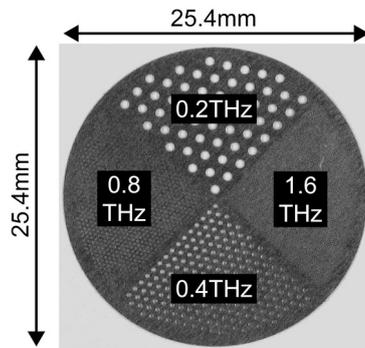


図 3 4 分割 MHA

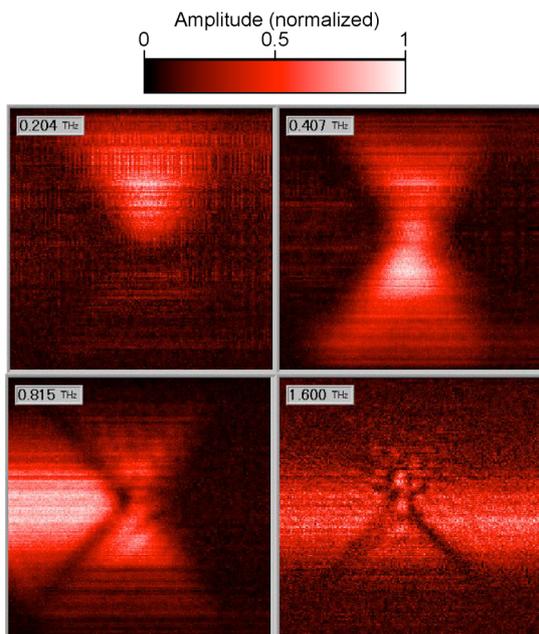


図 4 4 分割 MHA の測定結果 (サンプル移動速度=1mm/sec)

THz カラーキャナーが 100~10,000 倍近く高いことになる。図 5 は移動速度を 10mm/sec に増加した場合の測定結果 (測定時間 2 秒) を示しており、測定 SN 比は低下しているものの、同様な結果が得られていることが分かる。このようにして、世界で初めて動体サンプルの計測に成功した。

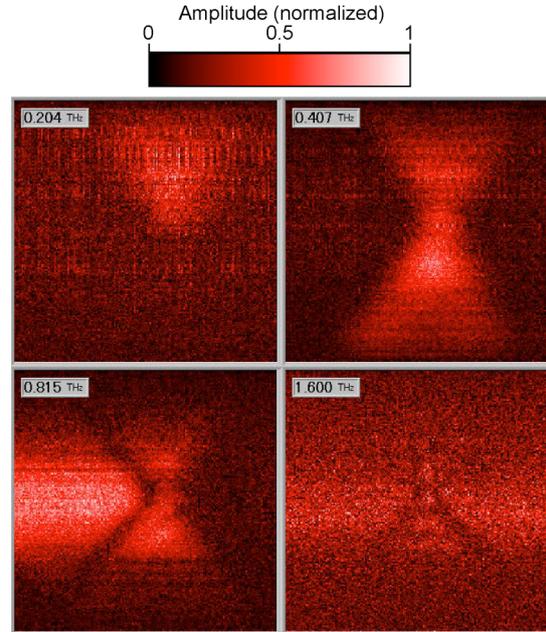


図 5 4 分割 MHA の測定結果 (サンプル移動速度=10mm/sec)

次に、ヒト歯牙切片の計測を行った。図 6 は測定結果を示しており、各周波数において特徴的な THz 分光画像が得られていることが分かる。硬組織である歯牙は、エナメル質と象牙質から成り、その主要成分は無機質のハイドロキシアパタイト (HOA) である。エナメル質の 96% は HOA であるが、象牙質には 20% ほど有機質 (コラーゲンなど) が含まれている。また、象牙質とエナメル質の境には球間区 (石灰化の不十分な部分) がある。このように局在した HOA の結晶構造と THz 波の相互作用により、特徴的な THz 吸収が現れたと考

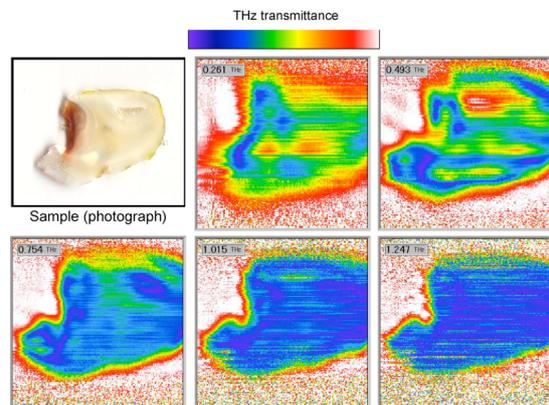


図 6 ヒト歯牙切片の測定結果

えられる。

また、生体以外にも、半導体 IC (図 7) や医薬品を始めとした各種工業製品の非破壊検査や品質評価にも適用可能であり、産業分野への応用が期待される。

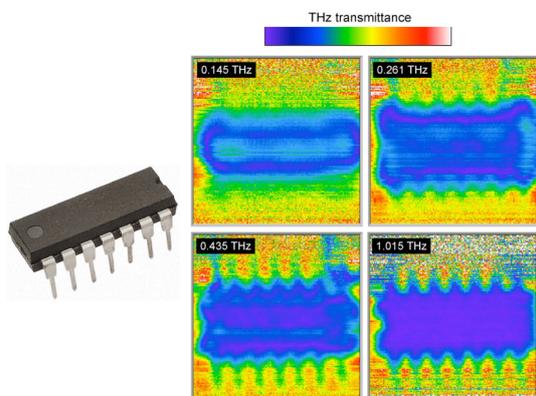


図 7 半導体 IC の測定結果

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 8 件)

- ① 安井武史, “テラヘルツ波検査技術の進展”, 超伝導 Web21, 2009 年 2 月号, 10-12, 2009, 査読無
- ② S. Yokoyama, R. Nakamura, M. Nose, T. Araki, and T. Yasui, “Terahertz spectrum analyzer based on a terahertz frequency comb”, Optics Express, 16, 13052-13061, 2008, 査読有.
- ③ T. Yasui, K. Sawanaka, A. Ihara, E. Abraham, M. Hashimoto, and T. Araki, “Real-time terahertz color scanner for moving objects”, Optics Express, 16, 1208-1221, 2008, 査読有.
- ④ 安井武史, 安田敬史, 荒木勉, “テラヘルツ波を用いた塗膜モニタリング技術”, 塗装工学, 43, 389-397, 2008, 査読有.
- ⑤ T. Yasuda, T. Iwata, T. Araki, and T. Yasui, “Improvement of minimum paint film thickness for THz paintmeters by multiple regression analysis”, Applied Optics, 46, 7518-7526, 2007, 査読有.
- ⑥ 安井武史, “テラヘルツ周波数コムの発生及び検出”, レーザー研究, 35, 627-632, 2007, 査読有.
- ⑦ T. Yasuda, T. Yasui, T. Araki, and E. Abraham, “Real-time two-dimensional terahertz tomography of moving objects”, Optics Communications, 267, 128-136, 2006, 査読有.
- ⑧ T. Yasui, Y. Kabetani, E. Saneyosh, S.

Yokoyama, and T. Araki, “Terahertz frequency comb by multi-frequency-heterodyning photoconductive detection for high-accuracy, high-resolution terahertz spectroscopy”, Applied Physics Letters, 88, 241104, 2006, 査読有.

[学会発表] (計 6 件)

- ① T. Yasui, R. Nakamura, A. Ihara, S. Yokoyama, H. Inaba, K. Minoshima, and T. Araki, “Terahertz spectrum analyzer for precise frequency measurement of CW THz source”, International Workshop on Terahertz Science and Technology, 2009/3/10, Santa Barbara, USA.
- ② T. Yasui, K. Sawanaka, A. Ihara, E. Abraham, and T. Araki, “Terahertz color scanner for moving object”, EOS Annual Meeting 2008: Topical meeting of Terahertz Science and Technology, 2008/9/29, Paris, France.
- ③ T. Yasui, Y. Kabetani, S. Yokoyama, and T. Araki, “Real-time, terahertz impulse radar based on asynchronous optical sampling”, Joint 33rd International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 15th International Conference on Terahertz Electronics, 2008/9/15 Pasadena, California, USA.
- ④ T. Yasui, K. Sawanaka, A. Ihara, and T. Araki, “Real-time, one-dimensional terahertz time-domain spectroscopic imaging of moving object”, Joint 32nd International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 15th International Conference on Terahertz Electronics, 2007/9/3, Cardiff, England.
- ⑤ T. Yasui, Y. Kabetani, S. Yokoyama and T. Araki, “Terahertz frequency-domain spectroscopy referring to as terahertz frequency comb”, Optical Terahertz Science and Technology, 2007/2/19, Orlando, USA.
- ⑥ T. Yasui, T. Yasuda, K. Sawanaka, and T. Araki, “Noncontact terahertz paintmeter for real-time two-dimensional cross-section imaging of paint film thickness”, 9th European Conference on Non-Destructive Testing, 2006/9/26, Berlin, German.

[図書] (計 1 件)

- ① 安井武史, NGT コーポレーション社, “テラヘルツ技術総覧 (分担執筆)”, 2007,

389-393 および 450-456.

[その他]

○報道関連情報 (計 4 件)

- ① 『テラヘルツ波で検査/阪大、電波の乱れ利用/食品の混入農薬や危険物』日経産業新聞 第 11 面 (2008/3/19) .
- ② 『動体測定可能に/阪大、”カラー Scanner” 開発/テラヘルツ波利用/荷物検査など応用』, 日刊工業新聞 第 22 面 (2008/3/13)
- ③ "Speedy and Colorful Terahertz Scanning/ Real-time imaging technique permits investigation of objects in motion", PHOTONICS SPECTRA, 42, 25-28, 2008.
- ④ 『驚きの透視パワー 不思議の波 テラヘルツ』, NHK 教育テレビ サイエンスゼロ (2007/2/17 放送) .

○賞罰 (計 2 件)

① 安井武史, 2009 年度応用物理学会光学論文賞, Real-time terahertz color scanner for moving objects, Optics Express, 16, 1208-1221, 2008.

② 安井武史, 橋本守, 荒木勉, 日本機械学会船井賞, 『テラヘルツ・カラー Scanner の開発』

○ホームページ

http://sml.me.es.osaka-u.ac.jp/araki_lab/research/thz/index.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安井 武史 (YASUI TAKESHI)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教

研究者番号: 7 0 3 1 4 4 0 8