

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月4日現在

機関番号：32612

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K19080

研究課題名(和文) シングルショットTHz波ハイパースペクトルイメージング

研究課題名(英文) Hyper-spectral Imaging of THz Wave on a Single-shot Basis

研究代表者

神成 文彦(Kannari, Fumihiko)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・教授

研究者番号：40204804

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：近赤外帯域のフェムト秒レーザーパルス用に開発した高速撮像法であるSF-STAMP法を、テラヘルツ波長での2次元イメージングが可能なE0サンプリングと組み合わせることで、単一ショットのテラヘルツ波域パーストイメージング法を実現した。

フェムト秒レーザーパルス(中心波長800nm, パルス幅50fs)を用いて発生させたテラヘルツパルスを使い、計測試料の像をE0結晶上に結像させた。GaAsウェハ試料にフェムト秒レーザー光を斜入射することで、空間的にフォトキャリア生成開始時間の差を生じさせ、テラヘルツ波吸収が起きている範囲が時間とともに掃引される様子を撮影することで超高速イメージングの原理実証を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

テラヘルツ波帯には多くの分子振動回転遷移が存在し、とくに糖やアミノ酸など比較的低分子の微小結晶粉末はテラヘルツ帯に固有の吸収が観測されるため非破壊検査などの応用が期待されている。しかし、異なる波長のマルチスペクトルイメージを計測するためには、遅延時間を走査したポンプ-プローブ計測をさらに2次元面内で空間走査して計測するのが一般的で非常に計測時間を要する。瞬時にマルチスペクトルイメージを撮像できる手法があれば、そのような応用には極めて重宝する。

周波数チャープしたテラヘルツ波をプローブパルスとして用いることで単一ショットのマルチスペクトルイメージを取得できる新手法を開発する。

研究成果の概要(英文)：In this study, SF-STAMP, which is an imaging method developed using femtosecond laser pulses in the near-infrared band, was combined with E0 sampling, which enables two-dimensional imaging at terahertz wavelengths. We realized a novel terahertz wave ultrafast burst imaging method.

Using femtosecond laser pulses (center wavelength of 800 nm, pulse width of 50 fs) as the light source, the image of the measurement sample was formed on the E0 crystal using terahertz pulses. Thereafter, E0 sampling was performed by a frequency-chirped femtosecond laser pulse to capture the two-dimensional image of the terahertz wave, and the spectral images of the femtosecond pulse were separated using an SF-STAMP optical system and imaged in different spaces of the CCD camera. By making femtosecond laser light incident at an angle to a GaAs wafer, we succeeded in capturing the dynamic expansion of photo-carrier generation area on the GaAs wafer.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：テラヘルツ波 フェムト秒レーザー 電気光学サンプリング 超高速パーストイメージング ハイパースペクトルイメージング

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

フェムト秒レーザーパルスで発生させたモノサイクル的な広帯域 THz 波を用い、物質を透過プローブしたパルスを時間領域で計測しフーリエ変換することでスペクトル解析を行う THz 時間領域分光法 (THz-TDS) は強力な THz 周波数の分光法である。ただし、「時間領域走査」は THz 波パルスの時間領域波形を測定するために必須である一方で、計測時間を律速する要因にもなっている。通常、十分に高出力のテラヘルツ波源や十分に高感度の検出器が簡単に利用できないため、信号の取得にはロックイン計測等の繰り返し計測を行い非常に時間がかかることが多い。この TDS でさらに 2 次元イメージングを行おうとした場合、THz 波の波長程度の空間分解能でイメージングするときの対象の大きさに依存するが、計測点倍の計測時間がさらに必要になるのは自明である。この結果、計測時間もさることながら、計測対象は、再現性のある動的な現象か静的なものに限られてしまう。THz 波パルスの繰り返し照射は、計測対象の温度上昇の影響等も危惧される場合がある。産業応用においては完全なスペクトル情報ではなく、いくつかの特徴的な吸収波長でのコントラストの比較があれば十分な場合が多い。しかし、TDS を用いる限り、波長を間引きして計測することは不可能である。

2. 研究の目的

本研究では、申請者等が光領域で開発した世界最高速バーストイメージング計測法である Sequentially Timed All-Optical Mapping Photography with Spectral Filtering (SF-STAMP)法[1]を応用し、周波数チャープした広帯域テラヘルツ(THz)電磁波 (0.5~2.5 THz) パルス内に選択した 5~25 の周波数における THz 波 2 次元透過イメージをシングルショットで一括取得できる「THz 波ハイパースペクトルイメージング法」の実現を最終目的とする。ただし、本手法は、周波数チャープしていない THz 波を用いた場合には、ピコ秒域の超高速現象を「シングルショットの THz 波パルスでバーストイメージングする方式」となることから、難易度的に低い後者の計測手法を最初に実現し、その後、周波数チャープ THz パルスを用いた前者の計測手法の開発に移行する。いずれの手法も、これまで繰り返し計測が必要であった THz 波イメージ計測法に大きな変革を与えることが可能となる。

3. 研究の方法

(1) SF-STAMP を用いた 2 次元 EO サンプルング法の原理実証実験

超高速現象をプローブした THz 波が誘起する EO 結晶内の屈折率変化を周波数チャープしたフェムト秒レーザーで計測すると、光パルスの各周波数に THz 波の瞬時イメージが転写できる。THz 波パルスに対するサンプリング光パルスのタイミングの関係を図 1 に示す。

(2) シングルショット THz 波ハイパースペクトルイメージ計測

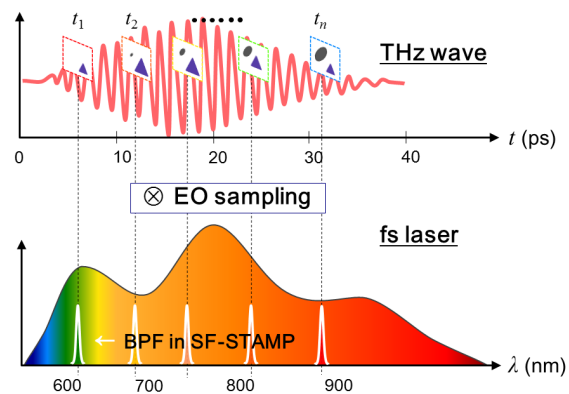


図 1 THz 波でプローブした瞬時イメージを EO 効果を通じて周波数チャープした光パルスの周波数成分に転写する概念図

周波数チャープ THz 波発生装置と STAMP を合体した 2 次元 EO サンプルリング計測装置を用いた実時間 THz 波ハイパースペクトルイメージ計測を行う。THz 波とサンプリング光パルスのスペクトル対応を図 2 に示す。周波数チャープした THz 波の時間情報は、瞬時 THz 周波数でプローブした各周波数でのイメージに対応する。この THz 波が誘起した EO 結晶内の屈折率変化を周波数チャープしたフェムト秒レーザーで計測すると、光パルスの各周波数に THz 波の周波数イメージが転写することになる。プローブパルスの周波数チャープレートを変えることで、計測できる THz 波周波数イメージを選択できる。

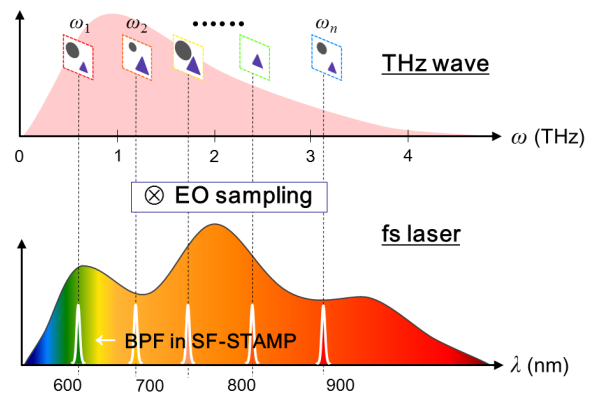


図 2 周波数チャープした THz 波でプローブした周波数毎のイメージを EO 効果を通じて周波数チャープした光パルスの周波数成分に転写する概念図

4. 研究成果

(1) THz-SF-STAMP 系の構築

高強度の THz 波パルスを発生するため、フェムト秒再生増幅器からのフェムト秒パルスレーザーを使って波面傾斜法 [2]を用いて THz 波発生を行った。光源は中心波長 800 nm、繰り返し周波数 1 kHz、パルス幅 50 fs、パルスエネルギー 700 μJ を用い、溝本数 1800 line/mm の回折格子に水平偏光で

入射した。焦点距離 $f=170$ mm と $f=100$ mm のシリンドリカルレンズを使って回折格子の像を LN 結晶内部のテラヘルツ発生面付近に結像するように LN 結晶を設置した。THz 発生系を図 3 に示す。

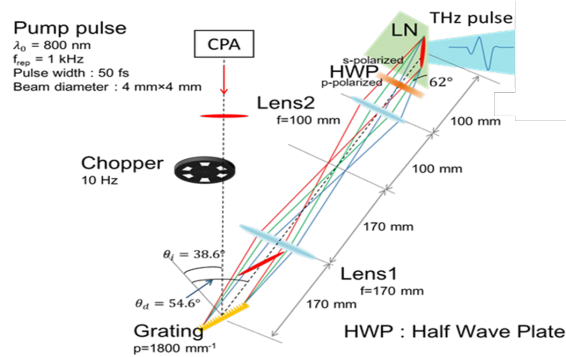


図 3 波面傾斜法を用いた THz パルス発生系

プローブ光は遅延光学系を通過後、時空間的に一致するように P 偏光で EO 結晶(厚さ 1 mm ZnTe) に入射し、テラヘルツ波による EO 効果を受けて楕円偏光となり、 $1/4$ 波長板によってリタデーション $\pi/2$ を加えられる。これをウォラストンプリズムで P 偏光成分, S 偏光成分に分離し、バランスディテクタで強度差を検出することでテラヘルツ波電界強度を計測した。検出感度をより高めるためにロックインアンプを信号の増幅に用い、その信号成分を取り出すためにテラヘルツ波には CPA システムと同期した 500 Hz の変調がかけられている。

THz 発生系と EO サンプルングおよび SF-STAMP を組み合わせた実験系を図 4 に示す。フェムト秒レーザー増幅器から出射されたフェムト秒レーザーパルスは、THz 波発生用パルス、高速現象をひき起こすためのポンパルス、SF-STAMP 用のプローブパルスの 3 つに分離される。観測時間窓は THz 波パルスの時間幅で決まるので、今回はマルチサイクル化させるために、ビームスプリッタを用いて THz 波発生用パルスをダブルパルス化した。EO サンプルイメージ

ングでは、2次元面内の偏光回転をクロス・ニコル配置で周波数チャープパルスでプローブしSF-STAMPでスペクトラルイメージに分割する。

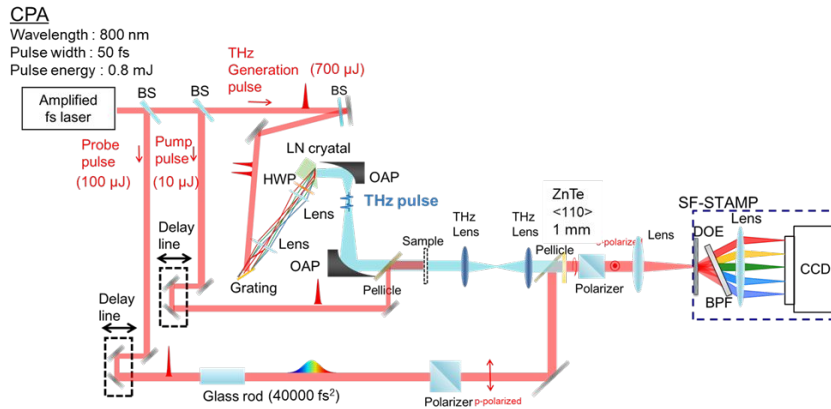


図4 THz-SF-STAMP 実験セットアップ

(2) GaAs におけるフォトキャリア生成イメージング実験

シングルショットパースタイムイメージングの実証実験として、フォトキャリアの生成によるGaAs ウェハの THz 波透過率の変化を撮影した。今回の試料のキャリア寿命は約 500 ps 以上であったため、フェムト秒レーザーによるキャリア生成のタイミングは吸収の増加によって撮影可能であるが、キャリア消滅による吸収減少は撮影できない。また、試料は欠陥発生をほどこしていないので、空間依存性も存在しない。そこで、GaAs に対して角度をつけてポンプ光を斜めに入射し視野の両端でポンプ光の到着時間の差を作ることで、キャリアが生成開始される時間に空間的にずれが生じ、時間が経つにつれてキャリア生成の範囲が高速に走査される様子を捉えることにした。キャリア生成の時間差は $\theta=5^\circ$ では視野の範囲内(8 mm)で 2.3 ps となる。

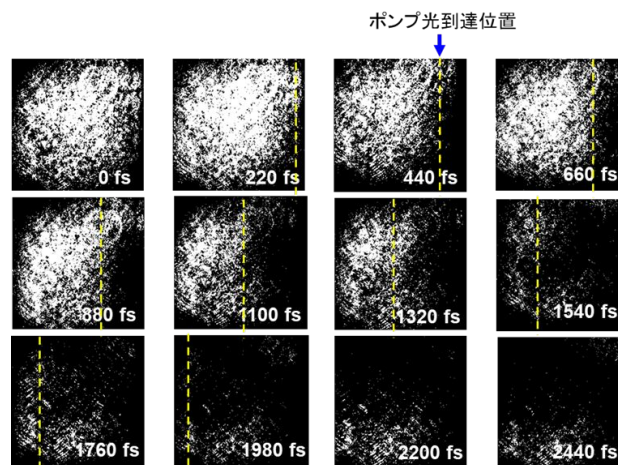


図5 GaAs におけるフォトキャリア生成が空間的に走査させる瞬間のイメージング。図の白い部分は THz 波の透過が高いことを示しており、まだフォトキャリアが生成されていない状態である。

EO イメージを SF-STAMP によって取得した結果を図5に示す。黄色の点線はポンプパルスの到達位置を表している。EO イメージは右側から左側に向かって徐々に暗くなっており、キャリアが生成したところで THz 波が吸収されていることを示している。また、EO イメージはポンプパルスが視野の端に到達している 2.44 ps の時点では完全に暗くなっている。これより、THz-SF-STAMP により THz 波で撮影された超高速現象の時間分解イメージをシングルショット2次元計測できることが実証された。今回の THz-SF-STAMP の時間特性はフレーム間隔 220 fs,

露光時間 0.8 ps, 時間窓 2.44 ps である。時間窓は、THz パルス幅で上限が決まるが、フレーム間隔は、周波数チャープパルスのチャープレートで可変にできる。

今回の実験ではサンプルとして欠陥の無い GaAs を用いたが、空間的にイオン注入した GaAs をサンプルとして用いることで、キャリア寿命分布から欠陥密度分布をイメージングできると考えられる。

(3) THz 帯バンドパスフィルタの作製

ハイパースペクトルイメージング用のサンプルとして金属の薄板に細孔を空けた MHA(Metal Hole Array)[3]フィルタを作製した。MHA は厚さ 0.3 mm, 一辺 25 mm のステンレス板に穴の大きさと間隔を変化させて作製したものである。THz 波の透過スペクトルを THz-TDS で計測して得られたスペクトルを図 6 に示す。異なる帯域の THz バンドパスフィルタとして機能していることがわかる。

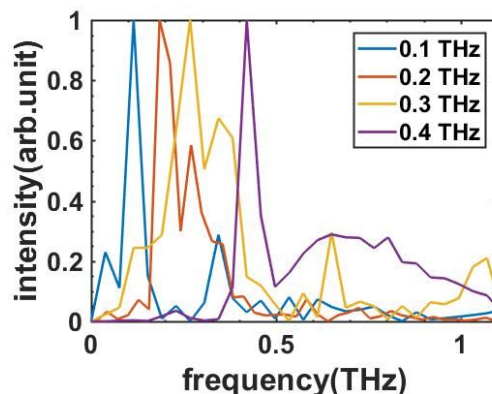


図 6 作成した MHA バンドパスフィルタの透過スペクトル

(4) 金属導波路を用いた周波数チャープテラヘルツ波発生

THz 波パルスは、金属平板導波路 PPWG(parallel-plate waveguide)[4]の伝播により著しい導波路分散を受ける。そこで、アルミ材を用いテラヘルツ波が 2mm の隙間を 4mm 伝搬できる導波路を設計製作し、PPWG 伝搬後のテラヘルツ波の波形を THz-TDS で取得した。PPWG 伝搬後の時間波形は入射の THz 波時間波形と比べると、サイクル数が増えており時間幅が伸びているが、きれいな線形チャープ波形にはなっていないことから、単一モード伝搬が実現されずモード間干渉が起きていると思われる。導波路への結合を再設計する必要があることが判明した。

一方、THz 波を伝送できる中空ファイバの実験も行ったが、ファイバ結合効率が著しく十分な透過パルス強度が得られる TDS 計測に至らなかった。以上より、THz 波ハイパースペクトルイメージ計測を実現するには周波数チャープ THz 波パルス発生が課題として残った。

<引用文献>

- T. Suzuki, F. Isa, L. Fujii, K. Hirose, K. Nakagawa, K. Goda, I. Sakuma, and F. Kannari, Opt. Express **23**, 30512 (2015).
- H. Hirori, A. Doi, F. Blanchard, and K. Tanaka, Appl. Phys. Lett. **98**, 91106 (2011).
- T. Yasui, K. Sawanaka, A. Ihara, E. Abraham, M. Hashimoto, and T. Araki, Opt. Express **16**, 1208 (2008).
- R. Mendis and D. M. Mittleman, J. Opt. Soc. Am. B **26**, A6 (2009).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 9 件)

松下 一輝, 鈴木 敬和, 山口 勇輝, 根本 寛史, 神成 文彦, “波長掃引超高速レーザパルス列を用いた透明固体材料中のレーザ誘起 応力波ダイナミクスのシングルショット 2 次元バーストイメージング,” 第 56 回応用物理学会春季学術講演会、東京工業大学大岡山キャンパス、平成 31 年 3 月 12 日 .

高澤 一輝, 鈴木 敬和, 山口 勇輝, 根本 寛史, 谷 正彦, 北原 英明, 神成 文彦, “SF-STAMP を用いた超高速現象シングルショットテラヘルツイメージング,” 第 56 回応用物理学会春季学術講演会、東京工業大学大岡山キャンパス、平成 31 年 3 月 12 日。

根本 寛史, 鈴木 敬和, 山口 勇輝, 神成 文彦, “長掃引超高速レーザーパルス列を用いたサブナノ秒領域 シングルショット 2 次元バーストイメージング,” レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会、東海大学高輪校舎 平成 31 年 1 月 13 日。

山口 勇輝, 鈴木 敬和, 根本 寛史, 高澤 一輝, 松下 一輝, 神成 文彦, “SF-STAMP を用いたテラヘルツ領域 シングルショット 2 次元超高速バーストイメージング,” レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会、東海大学高輪校舎 平成 31 年 1 月 13 日。

Yuki Yamaguchi, Takakazu Suzuki, Ryohei Hida, Fumihiko Kannari, “Single-shot Ultrafast 2D-burst Imaging with a Frequency-chirped Supercontinuum Laser Pulse,” The 24th Congress of the International Commission for Optics, Keio Plaza Hotel, 2018 年 8 月。

Hirofumi Nemoto, Takakazu Suzuki, Yuki Yamaguchi, Fumihiko Kannari, “Single-shot Ultrafast Burst Imaging by Spectrally Sweeping Pulse Train with 100-ps Interval,” The 13th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO Pacific Rim, CLEO-PR 2018), 2018 年 8 月。

Hirofumi Nemoto, Takakazu Suzuki, Yuki Yamaguchi, Ryohei Hida, Fumihiko Kannari, “Single-shot Ultrafast Imaging with Burst Pulses of 100-ps Interval,” the 7th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS2018), 2018 年 4 月。

根本 寛史, 鈴木 敬和, 山口 勇輝, 肥田 遼平, 神成 文彦, “異波長パルス列を用いたサブナノ秒間隔でのバーストイメージング,” 第 65 回応用物理学会春季学術講演会、早稲田大学西早稲田キャンパス、2018 年 3 月。

山口 勇輝, 根本 寛史, 鈴木 敬和, 神成 文彦, “周波数チャープパルスとスペクトラルフィルタリングを用いた全光学超高速 25 枚連写イメージング,” 第 38 回先端光量子科学アライアンスセミナー、慶應義塾大学日吉キャンパス来往舎、2018 年 3 月。

〔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〕

<http://www.kami.elec.keio.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：鈴木 敬和

ローマ字氏名 (SUZUKI, takakazu)

研究協力者氏名：山口 勇輝

ローマ字氏名 (YAMAGUCHI, yuki)

研究協力者氏名：根本 寛史

ローマ字氏名 (NEMOTO, hirofumi)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。