# 光技術を用いた超広帯域テラヘルツオシロスコープの開発

研究代表者:横浜国立大学 片山 郁文

#### 【基本構想】

テラヘルツ領域はエレクトロニクスとフォトニクスのそれぞれ得意とする周波数領域のちょうど中間に 位置しており、大容量高速通信を担う周波数として注目を集めている。しかしながらこの領域の電磁波は 非常に速い速度で変化するために、その電場波形を計測することはこれまでは難しかった。電場波形計測 は、材料の誘電率計測などの物性評価に有用なだけではなく、様々なテラヘルツデバイスの位相雑音評価 や、テラヘルツ領域のダイナミクスの評価、高速なイメージング等に必要である。そこで本プロジェクト では、このようなテラヘルツ領域の電磁波の波形を、超短パルスレーザーを用いた光技術を活用すること によってリアルタイムに計測する技術を確立し、それをファイバー技術と融合することによって、堅牢で 高精度・広帯域・高感度なテラヘルツ波形検出技術を開発することを目指している。本稿では、令和3年 度の成果として、高精度・広帯域なテラヘルツ波形検出の実証に成功したので報告する。

#### 1. 研究目的

テラヘルツ領域とは、周波数 10<sup>12</sup> Hz 程度の電磁波の総称であり、近年科学技術振興機構の戦略プロポーザル[1] や、総務省の戦略文書[2]などで取り上げられる等、注目 を集めている。例えば、光通信分野では、次世代大容量 通信に用いる周波数として、100 GHz (0.1 THz)や、300 GHz (0.3 THz)などの利用が検討されており、様々なデバ イス技術の開発や、材料特性の評価、応用などが研究さ れている。また、テラヘルツ領域の電磁波は多くの材質 を透過することから、新たなイメージング周波数領域と しても期待されている[3,4]。

一方で、デバイス開発や分光応用には、電場波形の計 測できるオシロスコープのようなシステムが極めて有効 であるが、テラヘルツ領域は極めて高周波数であるた め、汎用のオシロスコープが存在しないのが現状であ

め、汎用のオシロスコーフか存在 る。一方で超短パルスレーザー を用いた分光技術はテラヘルツ 領域の電磁波計測を容易にし、 現在では、テラヘルツ分光測定 技術として、計測器が市販され る状況になっている[4]。しかし ながら、通常のテラヘルツ時間 領域分光技術では、電場波形の 計測に繰り返し測定が必要とな るため、不可逆な現象や、突発 的な現象をリアルタイムに計測 することはできなかった。

本プロジェクトの目的は、こ のような超短パルスレーザーを 用いた時間領域テラヘルツ分光 法を高度化し、レーザーパルス 1パルスで、テラヘルツ電場波 形を計測できるシステムを開発 することである。そのために、著者らを含めて様々な研 究グループが開発してきたシングルショット分光法を改 良することによって、高精度・広帯域なテラヘルツ電場 波形計測を実現することを目的とした。さらに、開発し た光学系をファイバー化することによって、堅牢なリア ルタイムテラヘルツ時間領域分光計を開発し、様々な応 用が可能なテラヘルツ領域のリアルタイムオシロスコー プを実現することを目指す。本稿ではこれらの取組のう ち、令和3年度に実証実験に成功した高帯域・高精度な シングルショットテラヘルツ検出技術について報告す る。

#### 2. リアルタイム波形検出技術

レーザーパルス1パルスでテラヘルツ領域の時間領域 信号を計測する技術は、図1に示したように、主に三つ



図1:シングルショット波形検出技術:(a) 斜め交差型。(b) 階段状光学素子を利用する技術。 (c) チャープパルスを利用する技術。



図 2:歪み補正チャープパルスシングルショット波形検出技術:チャープパルスに変調波形を書き込んだ後、位相補償を行ったうえで チャープパルスとの和周波発生によってスペクトルを読み出すことで、元の変調波形に対応した波形を得ることができる。

の種類が存在する。一つは、図 1(a)のようにテラへルツ 領域の電磁波に対して、斜め、もしくは垂直にプローブ 光を交差させ、テラヘルツの電場によって電気光学結晶 内に生じる屈折率の変化を空間的に検出するものである [5]。この場合、テラヘルツ波とプローブ光との時間差は 場所ごとに異なることになるので、生じた屈折率変化を カメラに結像させれば、結晶上の位置が時間情報を与え ることになる。この手法は、結晶の大きさが時間窓の長 さに対応することになるため、あまり長い時間の情報を 得ることができない点と、テラヘルツ波を広げたまま電 磁波の波形を計測するため、電場強度をかせぐことが難 しい点が問題であった。

次に図1(b)のような、階段状の光学素子を用いる手法 が提案された[6,7]。この手法では、階段状のプリズム、 もしくはミラーを透過したプローブ光を電気光学結晶に 集光し、生じた屈折率変化を検出する。この手法では、 プローブ光を比較的小さく集光することができるため、 計測したいテラヘルツ波を集光することが可能であり、 比較的大きな信号を計測することが可能である。しかし この場合も階段状光学素子の画像をカメラに結像させ、 フーリエ面に電気光学結晶を置く必要があることから、 光学系の精密な調整が必要な点が課題であった。

一方で本研究では、図1(c)にあるような、チャープパ ルスを用いる手法を研究している[8]。この手法では、波 長ごとに到達時間の異なるチャープパルスと呼ばれるパ ルスを用いて、時間情報を波長にマッピングする。これ によって、プローブ光のスペクトルを観測すれば、時間 情報をシングルショットで計測することができるように なる。この手法の特徴は、波長という光の内部自由度で 時間情報を検出することから、回折限界まで集光可能で あること、時間窓幅を、チャープ量を変えることで可変 にできること、また、ファイバー技術などと融合するこ とにより、高速なスペクトル読み出しが可能であること などがある。一方で本手法の重大な問題点としては、ス ペクトルに書き込んだ時間波形が実際の波形から大きく ゆがんでしまう点があった[9]。

そこで本研究では、チャープパルス検出法においても 波形ゆがみなくテラヘルツ波形を書き込める手法を開発 し、さらに、ファイバベースの技術の組み合わせを進め ることによって、リアルタイムのテラヘルツ波形検出技 術を実証することを目指した。

#### 3. テラヘルツ波形検出の原理

チャープパルス検出法における波形歪みを解消するた めに、今回提案するチャープパルス検出法の原理を図2 にまとめた。通常のチャープパルス検出法では、チャー プパルスに直接波形を書き込むため、書き込み過程で生 じたチャープパルスと信号の和周波成分、差周波成分が 元のチャープパルスと同じ周波数領域に発生する。この ため、信号と元のチャープパルスとの干渉が発生し、こ れによってスペクトルに干渉パターンがのるのが問題で あった。これを解消するために、我々は波形の書き込み 過程と読み出し過程を分離し、信号の書き込み直後に位 相補正を行い、その後、プローブ光と同様のチャープパ ルスとの和周波発生スペクトルを検出することで波形歪 みのない変調波形を得ることができる技術[10]をテラへ ルツ測定に適用することを提案した。このように二段階 の変調過程を利用することによって、もともと周波数領 域に広がっていた変調成分が、時間領域に広がる形にマ ッピングされており、実際に観測される波形も歪みのな いものとなる。

図3に今回構築した実験系の概略図を示す。光源としては、パルス幅150fs、繰り返し周波数1kHz、出力1.9W、波長800nmのTi: sapphire 再生増幅レーザーを用いた。用いたレーザーの出力は、ポンプ光とプローブ光に分けられ、ポンプ光はテラヘルツ波発生用の有機非線形結晶BNAに照射し、テラヘルツを発生させた。プローブ光は、回折格子対を用いたパルス幅伸長器を通し、正



図3: 歪み補正チャープパルスシングルショット波形検出実験系:分散補償には、回折格子対を用いた位相制御技術を用いた。

の分散を付与し、試料位置で光やテラヘルツ波による変 調を可能とした。書き込み(変調)後に波形歪みが生じ ないように負分散を持つ回折格子対で位相を制御したう えで、読み出し用のチャープパルスとの和周波発生を行 い、得られたスペクトルから波形を検出した。和周波発 生には、BBOを用いた。スペクトルは 50 cm の分光器で 波長を分散させ高速リニアセンサで検出した。

また、今回の測定では、検出感度を高めるために、EO 結晶の前後に偏光子を設置し、クロスニコル配置とし、 その間に挟んだλ/4を微小に回転させることで、検出感 度を最大限向上させる試みも行った。このような手法は 位相オフセット法と呼ばれているが、これによって、テ ラヘルツ波形検出系を高感度化することができる。

図4に典型的に得られた、テラヘルツ電場波形計測結 果を示す。参考までに従来の波形補正をしない手法で計 測したテラヘルツ波形と、シングルショットではなく通 常のステージ掃引を用いる手法で測定したテラヘルツ波 形の測定結果についても示した。図4を見ると明らかな ように、従来の手法では大きな波形歪みが観測されてお り、通常のステージスキャン法と全く異なる波形が得ら れてしまっている。一方で、我々の提案した書き込み過 程と読み出し過程を分離し、位相補正を行う手法におい ては、観測されるテラヘルツ波形は、ステージ掃引を用 いる方法とほぼ同等であることがわかる。このように、 本提案技術は、テラヘルツ領域の電磁波の可視化に極め て有望な技術であると言える。

#### 4. 窓幅可変性・検出帯域

3章で述べたように、位相オフセット法を用いること によって、高感度なテラヘルツ波形検出が可能となっ



図4:位相補正シングルショット波形検出技術実証結果:(a) 位相補正を行ったテラヘルツは検出波形。四半波長板(QWP)の角度を± 3°に設定した際の波形を示した。(b) 位相補正を行わない、従来のテラヘルツ検出波形。(c) 正負の波形の差分を取った波形。(d) 通 常のステージ掃引法で得られた波形との比較。(e) 検出された波形のフーリエスペクトル。



図 5: LiNbO3単結晶における光誘起偏光回転の測定結果:(a) 窓幅 8 ps の場合の時間波形。位相補 正を行った場合と行わなかった場合の波形を示した。(b) 窓幅 20 ps の場合の測定結果。位相補正す ることで、窓幅に関わらず歪みのない波形が得られている。斜め交差型。(c) 結晶軸に対して偏光配 置を変えて測定した結果。偏光によって波形が異なることがわかる。(d)(c)で得られた結果のフーリ エスペクトル。

するポンプ光・プローブ光 の偏光配置によって、3 THzから4THz程度のポラ リトン振動が観測されるこ とが分かっている。

図 5(c), (d)は、観測され た、ポラリトン振動の振動 波形とスペクトルを示して いる。まず振動波形を見る とわかるように、ポンプパ ルスが入射すると、偏光の 変化が誘起され、その時間 波形には振動する成分が観 測されることがわかった。 この時間波形から、時間原 点近傍の成分を差し引きフ ーリエ変換したところ、偏 光配置によって観測された 信号は3THz、4THzのフ オノンポラリトンであるこ とが分かった。このこと は、今回構築した波形補正 の技術が少なくとも数 THz の周波数領域にまで適用可 能であることを示唆してい る。したがって、本提案技 術は、高感度かつ広帯域に

た。一方で、シングルショットのテラヘルツ分光技術が 実応用を見出すためには、その特徴である、窓幅可変性 やファイバー技術との融合についても調べていく必要が ある。そのためにまず、書き込み・読み出し用のチャー プパルスと位相補正用の回折格子対、などの分散を変え ながら、変調信号の現れ方を調べた。

図 5(a), (b)にその結果を示す。ここでは、光励起によっ て生じる偏光回転を測定する実験配置を取った。この実 験では、チャープパルスのチャープ量、すなわち窓幅を 変更した場合、位相補正においてもチャープ量を変化さ せる必要があるため、これらの調整に時間がかかり、二 つの実験で完全に同じ実験条件とすることが難しい。こ のため、これらの観測される波形には微妙に違いが見ら れるが、おおむね同様の信号が異なる窓幅でも観測でき ていることがわかる。これはチャープパルスを用いた検 出法が広い窓幅範囲を連続的に調べることのできる手法 であることを示している。

次に、今回提案しているシングルショット検出手法の 広帯域性の実証を目指した。現状のテラヘルツ検出で は、検出帯域が電気光学結晶として用いている ZnTeで 制限されてしまうため、図 5(a),(b)と同様に、光パルスを 照射した際に生じる偏光回転を検出する実験系を用い、 その時間波形を計測することを試みた。試料としては高 周波数にポラリトン分枝を持つことが知られている LiNiO3単結晶を用いた[11]。この結晶においては、入射 テラヘルツ領域の波形検出を実現できることがわかる。

#### 5. リアルタイム波形検出の応用

最後に、今回開発した技術ではないが、一世代前のシ ングルショットテラヘルツ検出技術(図1(b))を用いた リアルタイム波形検出の応用について紹介する。実験で は、反射型エシェロンと呼ばれる階段状の光学素子を用 いた図6(a)のような光学系を用いた。この実験では、レ ーザー加工の初期過程において重要な寄与をもたらすと 考えられる電荷分離過程から生じるテラヘルツ波の検出 を試みた。レーザー加工では、光パルスの照射と共に、 表面の形状が変化していくため、レーザー1パルスごと の波形を検出することが極めて重要となる。一方で、レ ーザー加工初期過程からのテラヘルツ波は電場強度が小 さいため、感度を向上させるために、前節でも用いた位 相オフセット法を採用した。

フェムト秒レーザー加工は、フェムト秒レーザーの応 用として最も重要なものの一つであり、非接触に高い精 度で加工することが可能であり、加工対象を選ばず、高 精度な加工が実現できることから、筐体などの加工か ら、インフラの塗装や錆の除去、表面改質による機能性 の付与や性能改善など、様々な応用が盛んに研究され、 有効性が実証されている。これらの応用には高精度かつ 高効率な加工が重要であるが、現状のレーザー加工で は、加工深さの制御や、加工効率(スループット)の向



図 6: LiNbO3単結晶における光誘起偏光回転の測定結果:(a) 窓幅 8 ps の場合の時間波形。位相補正を行った場合と行わなかった場 合の波形を示した。(b) 窓幅 20 ps の場合の測定結果。位相補正することで、窓幅に関わらず歪みのない波形が得られている。斜め交 差型。(c) 結晶軸に対して偏光配置を変えて測定した結果。偏光によって波形が異なることがわかる。(d)(c)で得られた結果のフーリ エスペクトル。[12] Copyright 2022, Optica Publishing Group. All right reserved.

上が課題であった。これらを実現するためには、加工プ ロセスをモニタリングし、かつメカニズムを理解した上 で、パルスごとに加工を制御する必要がある。そこで 我々は、テラヘルツ波の検出がフェムト秒レーザー加工 の初期過程の理解に重要であるとの観点から、レーザー 加工時のテラヘルツ波をパルスごとに検出することを試 みた[12]。

フェムト秒レーザー加工時に発生するテラヘルツ波に ついては、すでに報告があるが[13]、パルスごとの計測 はこれまでに実現されていない。図 6(b)は実際に今回の 測定系で計測したテラヘルツパルスの電場波形である。 これはレーザー1パルスで測定したものであるが、高い 信号雑音比で波形検出が行えていることがわかる。(c)は この信号をフーリエ変換したものであるが、数 THz まで の帯域の信号が得られている。さらに、このテラヘルツ 波形の励起密度依存性やパルス数依存性を測定すること で、放射テラヘルツ波の電場波形が徐々に変化してお り、その形状がレーザー加工量との相関を持つことも分 かった。これらのことは、リアルタイムのテラヘルツ計 測がレーザー加工のモニタリングに有効であることを示 す結果である[12]。

## 6. まとめ

以上のように、位相補正も加えた新たなシングルショ ットテラヘルツ時間領域分技術の開発に成功し、高い精 度でテラヘルツ波形を得ることができることを示した。 また、リアルタイムテラヘルツ波形計測が、レーザー加 工の初期過程のモニタリングに応用可能であることが分 かった。今後は、本技術の高度化を進めるとともに、シ ングルショット技術の応用展開をさらに進め、テラヘル ツオシロスコープ技術の確立を目指したい。

#### 【参考文献】

- 1. JST CRDS、戦略プロポーザル「次世代通信技術の高 度化に向けた無線・光融合基盤技術」、2022 年 3 月。
- 総務省、「Beyond 5G 推進戦略 -6G へのロードマップ -」、2020 年 6 月。
- 3. E. Castro-Camus et al., Appl. Phys. B 128, 12 (2022).
- 4. 斗内政吉編、「テラヘルツ波産業創成の課題と展望」、 シーエムシー出版、2022。
- 5. M. Bonn et al., Opt. Lett. 25, 426 (2000).
- 6. G. P. Wakeham et al., Opt. Lett. 25 505 (2000).
- 7. Y. Minami et al., Appl. Phys. Lett. 103, 051103 (2007).
- 8. Z. Jiang et al., Opt. Lett. 23, 1114 (1998).
- 9. I. A. Shkrob, et al., J. Appl. Phys. 96, 25 (2004).
- 10.P. Suret et al., Nat. Commun. 7, 13136 (2016).
- 11.T. Kuribayashi et al., J. Appl. Phys. 123, 174103 (2018).
- 12.R. Tamaki et al., Opt. Exp. 30, 23622 (2022).
- 13.S. Tani et al., Proc. SPIE 10252, 102520H (2017).

# 業績

【口頭発表】

- 笠井 達基、玉置 亮、浅井 岳、秦 大樹、久保 肇、 片山 郁文、「光加工プロセスにおけるテラヘルツ放射 のシングルショット計測」、応用物理学会秋季学術講 演会(2021年9月、オンライン)
- 玉置 亮、笠井 達基、浅井 岳、秦 大樹、久保 肇、 片山 郁文、「フェムト秒レーザー加工におけるテラへ ルツ放射計測」、OPJ 日本光学会年次学術講演会 (2021 年 10 月、東京)
- 3. 玉置 亮、笠井 達基、浅井 岳、秦 大樹、久保 肇、 瀧川 雄一、片山 郁文、「フェムト秒レーザー加工に おけるテラヘルツ放射の CEP 解析」、日本物理学会年 次大会(2022年3月、オンライン)
- 4. 笠井 達基、玉置 亮、浅井 岳、秦 大樹、久保 肇、 瀧川 雄一、武田 淳、片山 郁文、「テラヘルツ波放射 を用いたレーザーアブレーション初期過程における電 荷分離ダイナミクスの可視化」、応用物理学会春季学 術講演会(2022年3月、相模原)
- 5. 玉置 亮、鈴木 雅史、武田 淳、片山 郁文、「分散補 償チャープパルス分光法によるシングルショット超高 速応答計測」、応用物理学会春季学術講演会(2022年 3月、相模原)
- 6. 鈴木 雅史、玉置 亮、武田 淳、片山 郁文、「分散補 償チャープパルス分光法による強誘電体フォノンポラ リトンの観測」、応用物理学会春季学術講演会(2022 年3月、相模原)
- 7. 片山 郁文(招待講演)、「フェムト秒レーザー加工初 期過程におけるテラヘルツ放射」、多元技術融合光プ ロセス研究会(2022年3月、オンライン)

### 【特許】

(1)国内特許出願 1件(2)国際特許出願 0件