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 4 年度の成果として、実証技術のベンチマーク結果と応用について報告する。

1.　研究目的

テラヘルツ領域とは、周波数 10^{12} 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。

テラヘルツ波のエネルギーは、室温のエネルギーよりも十分小さいことから、我々の身の回りはテラヘルツ領域の電磁波を放出する光源が多数ある。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によって、このような電磁波の波形を可視化する技術を確立し、そこから新たな情報を得ることができるようにすることにある。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

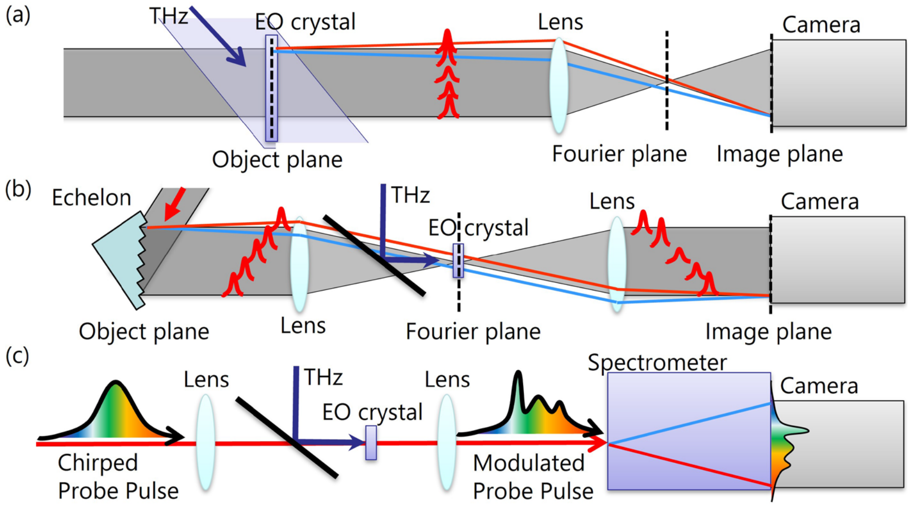

図 1 シングルショット波形検出技術：(a) 斜め交差型。(b) 階段状光学素子を利用する技術。(c) チャープパルスを利用する技術。

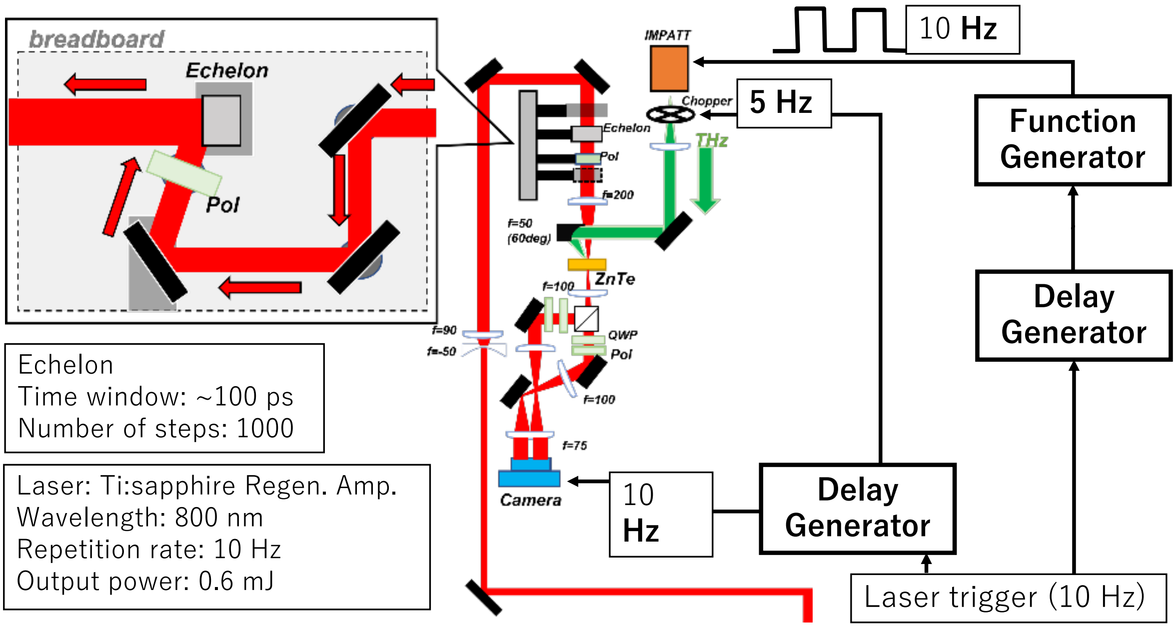

図 2 反射型エシェロンを用いたテラヘルツ波形検出実験の実験配置図。IMPATT ダイオードからのテラヘルツ波（0.15 THz、10 mW）を電気光学結晶に集光し生じた偏光回転を 10 Hz のレーザーをプローブ光として用いることで検出した。IMPATT ダイオードは、スイッチの ON/OFF を、ファンクションジェネレーターを用いて発生させた電気信号で行い、チョッパーでテラヘルツ波のあり、なしによる透過光強度の変化を計測することで電場波形を得た。Pol: 偏光子、QWP: 四半波長板。

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した。本稿ではこれらの取組のうち、令和 4 年度に実証実験に成功したテラヘルツデバイスからの電磁波の可視化技術と、開発したチャープパルスを用いたシングルショットテラヘルツ検出技術をベンチマークした結果について報告する。

2.　シングルショット波形検出技術

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、主に三つの種類が存在する。一つは、図 1(a)のようにテラヘ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、階段状のプリズムを透過、もしくは階段状のミラーを反射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となる。

一方で、図 1(c)にあるような、チャープパルスを用いる手法では、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[8]。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、図 1(b)を用いた高感度のテラヘルツ波形検出実験により応用を実証しつつ、令和 3 年度に実証した図 1(c)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高度化し、感度を向上させるとともに、ファイバーベースの技術の組み合わせを進めることによって、ロバストな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.　テラヘルツデバイスの波形検出

本年度はまず、反射型エシェロンを用いたシングルショット計測手法（図 1(b)）を用いて、テラヘルツデバイスからの電場波形検出の実証実験を行った。図 2 にその実験配置図を示す。図 2 の右側に示したように、テラヘ

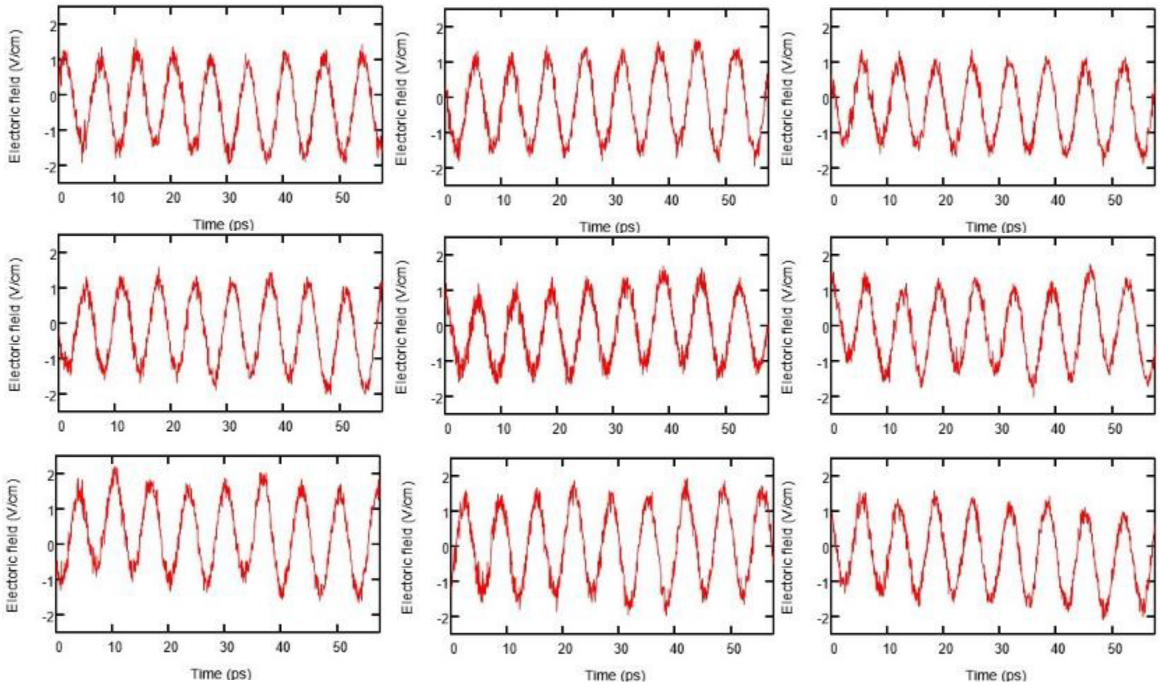

図 3　IMPATT ダイオードから出力されるテラヘルツ波の電場波形。

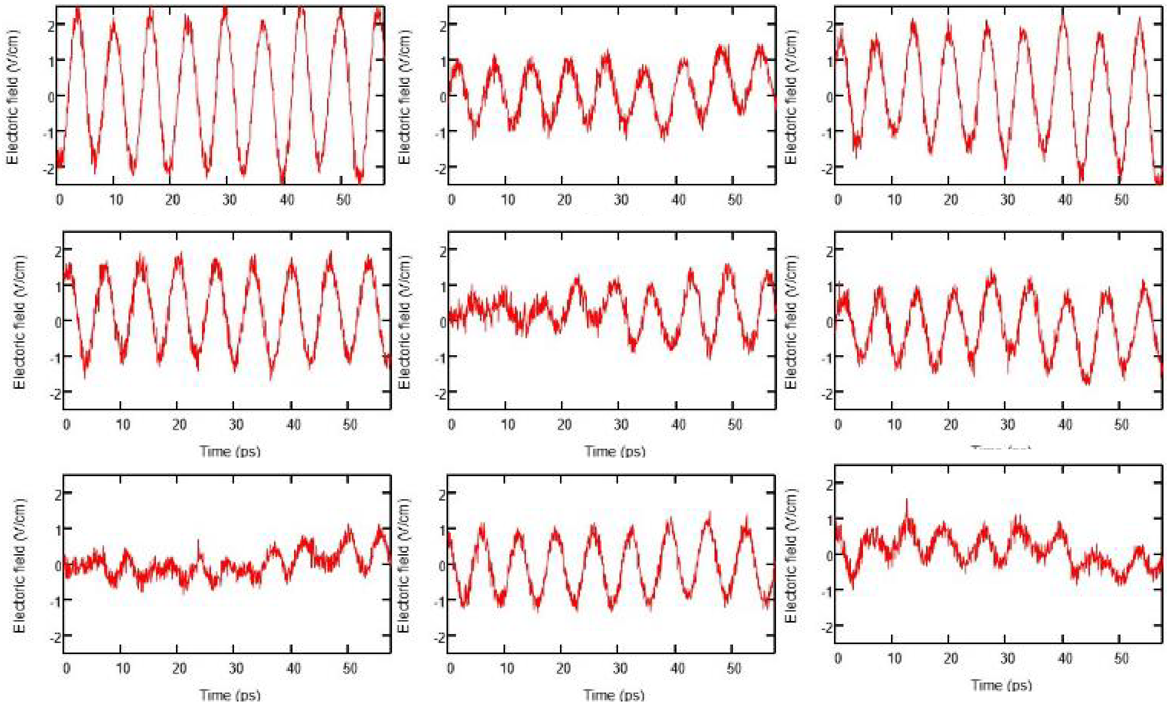

図 4　IMPATT ダイオードから出力されるテラヘルツ波の電場波形。ON/OFF のタイミングとプローブ光の照射タイミングを調整して計測した。

ルツデバイスの ON/OFF をファンクションジェネレーターで行っている。テラヘルツ光源としては、IMPATT ダイオードの出力を用い、10 Hz の Ti: Sapphire 再生増幅レーザーの出力を、プローブ光として用いている。階段状のミラーである反射型エシェロンは、窓幅が 100 ps 程度のものを採用し、クロスニコルにした偏光子の間に設置した四半波長板の回転角を正負に微小回転させた二つの信号を、カメラを用いて計測し、それぞれの差分を取ることによって、テラヘルツ領域の電場波形を得ている。

図 3 および図 4 は、このようにして得られた電場波形をプローブパルスごとに計測した結果を示したものである。図 3 ではプローブ光照射タイミングは常にデバイスが ON であるように設定しているため、ほぼ同様のテラヘルツ領域の電磁波が計測されている。振動の周波数はほぼ 0.15 THz であり、計測された電場振幅は約 1.5 V/cm であった。これらの計測結果は、IMPATT ダイオードの出力仕様から見積もられるものと近く、テラヘルツ出力の電場波形を計測することに成功したといえる。この時、これらの計測はプローブ光のパルスごとに行われていることから、それぞれの波形の位相は大きく異なるこ

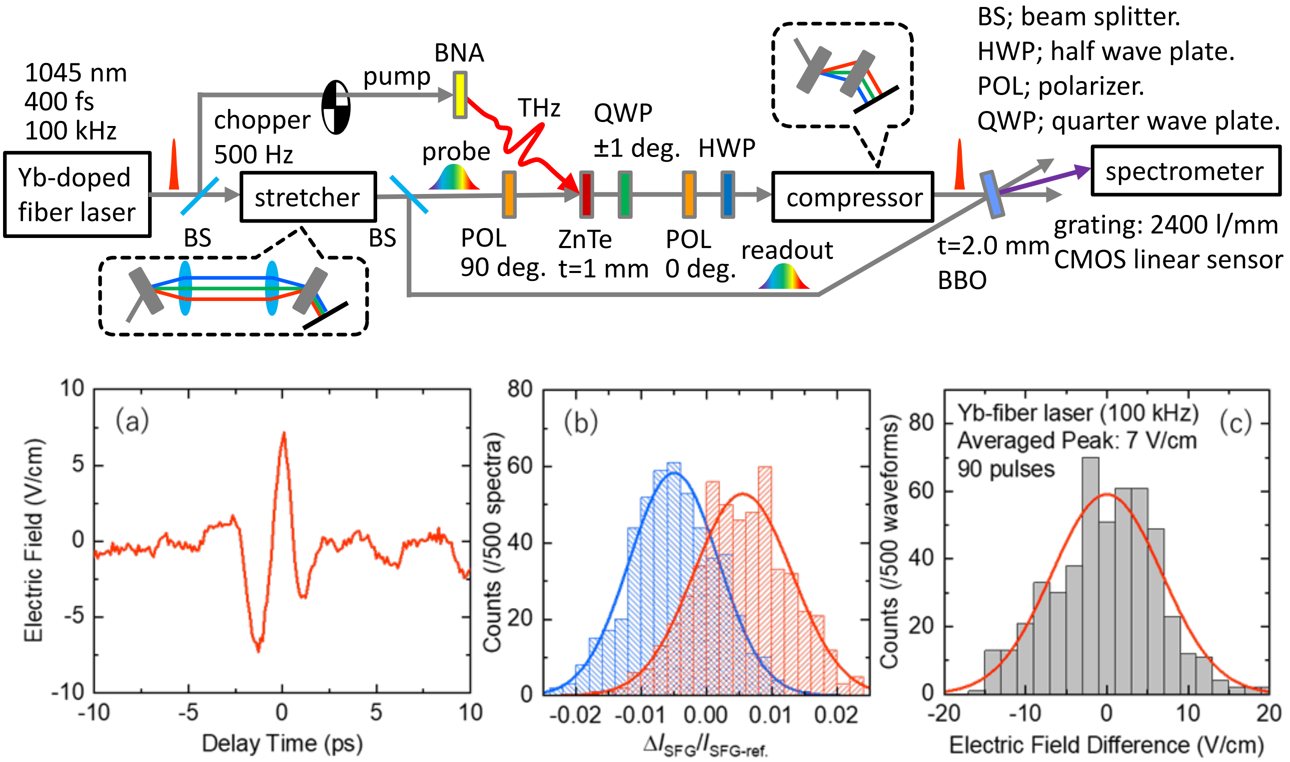

図 5　1 μm ファイバーレーザーを用いたテラヘルツ波形検出の実験配置図と実験結果。(a) 一秒積算によるテラヘルツ波形。(b) パルスごとの最大、最小振幅のゆらぎ。横軸は、テラヘルツあるなしの信号差を規格化した信号強度である。(c) テラヘルツ信号振幅のゆらぎ分布

とが見て取れる。このことはシングルショット分光法を用いれば、位相が揺らいでいるデバイスを用いても電場波形が計測できることを示しており、興味深い。

次に図 4 は、電気信号を調整することによって、デバイスを ON/OFF するタイミングでプローブ光を照射した場合の計測波形結果を示す。この条件では図 3 とは異なり、大きく振幅や波形が変化していることがわかる。これは、電気信号のタイミングとレーザーのタイミングが揺らいでいるためであると考えられる。興味深いのは、図 4 の左上にあるような振幅が大きな波形や、中央のような次第に振幅が上昇する波形などが得られていることである。これらのことは、スイッチの ON/OFF 時などにおけるテラヘルツ出力の波形を評価するうえで、本技術が非常に有効であることを示している。また、スイッチの ON/OFF 時には、数十 ps の範囲でテラヘルツ強度が上昇することもわかる。今後は、このような初期ダイナミクス、デバイスの設計とどう関係しているかを明らかにしていく。

4.　ファイバー化に向けた検討

上記のように、シングルショットのテラヘルツ計測技術を活用することによって、テラヘルツデバイスの評価などに活用が可能であることが分かった。一方で、これに用いた技術は、固体レーザーを用いており、自由空間で、ミラーやレンズを用いた光学系を構築している。したがって、装置全体は大きなスペースを占め、さらに、ミラーやレンズの精密な調整が必要となる。これらの点は本技術を応用するための大きな障壁となっていると考えられる。

そこで、本年度は、昨年度実証したチャープパルスを用いた、シングルショットの波形検出技術を応用し、ファイバー技術を適用していく検討を開始した。図 5 はその検討結果をまとめたものである。用いるファイバーレーザーの波長は、強いパルスが実現できる、Yb ファイバーレーザーの 1 μm 帯を用い、昨年度の実証実験と同様に、チャープパルスに変調を付与したのちに、それと読み出し光との和周波信号を計測することで、テラヘルツ電場波形を計測している。図 5(a)は得られた信号から計測したテラヘルツ波形を 1 秒間（90 パルス×500 回）平均したものであり、テラヘルツ電場波形が計測できていることがわかる。また、図 5(b)、図 5(c)に示したように、計測される信号の変調度は、プラスマイナス 1%程度揺らいでおり、換算される電場強度も同様に数 V/cm ほどのゆらぎが見られる。今回の実証では、励起レーザーの波長が変化したため、発生されているテラヘルツ波の電場強度が小さく、ゆらぎが大きいが、電場強度が大きいテラヘルツ波を用意することができれば、高い信号雑音比での計測が可能となるものと考えられる。

以上のことから、テラヘルツ波形計測手法として、ファイバーレーザーを用いた計測も可能であることを明らかにした。今後は、実験系の様々なコンポーネントをファイバー化していき、計測器全体のコンパクト化と、ロ

バスト化を進めていく。さらに、検出系などにおいても高速のスペクトル検出手法を組み合わせていくことで、高繰り返しな計測も可能になるものと期待できる。

5．　まとめ

以上のように、令和 4 年度は、テラヘルツデバイスから放出されるテラヘルツ波の電場波形の検出に成功したほか、ファイバーベースの技術を用いて、チャープパルスを用いたゆがみのないシングルショットテラヘルツ波形検出技術を実証することができた。今後は、これらの技術をさらに発展させ、ロバストなテラヘルツ波形検出技術を実証することで、テラヘルツ波形検出を手軽に実現することのできる装置の開発に近づけたいと考えている。

References

[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。

[2] 総務省、「Beyond 5G 推進戦略 －6G へのロードマップー」、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).

業績

【原著論文】

1. R. Tamaki, T. Kasai, G. Asai, D. Hata, H. Kubo, Y. Takigawa, J. Takeda, I. Katayama, “Pulse-to-pulse detection of terahertz radiation emitted from the femtosecond laser ablation process,” Optics Express 30, 23622 (2022).
2. M. Kobayashi, Y. Arashida, K. Asakawa, K. Kaneshima, M. Kuwahara, K. Konishi, J. Yumoto, M. K.-Gonokami, J. Takeda, I. Katayama, “Pulse-to-Pulse Ultrafast Dynamics of Highly Photoexcited $Ge_2Sb_2Te_5$ Thin Films,” Japanese Journal of Applied Physics 62, 022001 (2023).

【口頭発表】

1. 【Invited】I. Katayama and R. Tamaki, “Singleshot and high-sensitivity detection of terahertz waveforms using phase-offset electro-optic sampling and an echelon mirror,” SPIE Photonics West, LASE 2023, 12406-03, 1st February 2023, San Francisco, CA, USA.
2. R. Tamaki, M. Suzuki, J. Takeda, and I. Katayama, “Chirped-pulse up-conversion spectroscopy with dispersion compensation using a Yb-doped fiber laser,” International Symposium on Frontiers in THz Technology, Thu1-3, 17th November 2022, Fukui, Japan.
3. R. Tamaki, T. Kasai, G. Asai, D. Hata, H. Kubo, Y. Takigawa, J. Takeda, I. Katayama, “Femtosecond Ablation Dynamics Observed with Terahertz Radiation,” International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves 2022, Th-P-61, 1st September 2022, Delft, Netherland.
4. R. Tamaki, M. Suzuki, J. Takeda, and I. Katayama, “Terahertz Time-Domain Spectroscopy using Chirped-Pulse Up-Conversion with Dispersion Compensation,” Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, CTuP3C-01, 2nd August 2022, Sapporo, Japan.
5. R. Tamaki, T. Kasai, G. Asai, D. Hata, H. Kubo, Y. Takigawa, J. Takeda and I. Katayama, “Single-shot Detection of Terahertz Radiation Waveform Emitted from Femtosecond Laser Ablation,” Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, CTuP3D-02, 2nd August 2022, Sapporo, Japan.
6. R. Tamaki, M. Suzuki, J. Takeda, and I. Katayama, “Chirped-Pulse Up-Conversion Spectroscopy Applicable to Terahertz Waveform Detection in Time-Domain,” the International Conference on Ultrafast Phenomena (UP) 2022, Tu4A.46, 19th July, 2022, Quebec, Canada and online.
7. 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和周波分光法による高感度シングルショットテラヘルツ波形計測」、応用物理学会春季学術講演会（2023 年 3 月 16 日、東京、16p-A202-2）
8. 【招待講演】片山郁文、玉置亮、「リアルタイムテラヘルツ波形検出技術の開発と応用」、レーザー学会学術講演会（2023 年 1 月 19 日、名古屋、X04-19p-XIII-01）
9. 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テラヘルツ時間波形計測」、日本物理学会秋季大会（2022 年 9 月 14 日、東京、14pW242-9）
10. 熊谷洸毅、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、「レーザーアブレーションにおける加工面積と放射テラヘルツ波の相関」、応用物理学会秋季学術講演会（2022 年 9 月 21 日、仙台、21a-A202-3）
11. 髙橋洸矢, 有川敬, 笠井達基, 玉置亮, 片山郁文、「シングルショットテラヘルツ時間領域分光法を用いた連続波テラヘルツ光源の電場波形計測」、応用物理学会秋季学術講演会（2022 年 9 月 21 日、仙台、21p-A202-4）