

光ファイバーベース 高感度テラヘルツオシロスコープの実現

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・ピコ秒領域は、エレクトロニクスが得意とする周波数領域と、光・フォトンクスが得意とする周波数領域・時間領域のちょうど中間に位置しており、研究や応用が難しい領域として知られてきた。近年では、超短パルスレーザー技術の発展により簡単にこの領域の電磁波や超高速ダイナミクスを発生検出できるようになり、様々な応用可能性が議論されるようになってきているが、その応用は進んでいない。そこで我々はこの領域の研究を妨げる要因の一つとして、リアルタイムにテラヘルツ・ピコ秒の波形を可視化する技術が不足していることがあると考え、リアルタイム波形計測技術を開発することを目指した。さらに、この可視化技術、すなわちテラヘルツオシロスコープ技術を高感度化し、光ファイバーベースの装置とすることで、テラヘルツ・ピコ秒波形の堅牢なリアルタイム検出装置を実現することを目指した。本稿では、これらの技術の概要を示し、その応用例として、半導体レーザーダイオードからのピコ秒パルス発生可視化と、共鳴トンネルダイオードからのテラヘルツ出力波形計測結果について報告する。

1. 研究目的

テラヘルツ領域・ピコ秒領域は、周波数 10^{12} Hz、時間にして 10^{-12} s の領域を指し、電場の変化があまりに早いことから、エレクトロニクスで扱うことが極めて難しい周波数領域であった。例えば、電圧波形をモニターするために良く用いられるオシロスコープは、半導体素子の処理速度の関係から 100 GHz を超えることが極めて難しく、テラヘルツ領域・ピコ秒領域の高感度な波形検出はほとんど実現されていない。また、計算機の処理速度も CPU コアあたり GHz を少し超えたところで頭打ちになっている他、無線通信などで用いられるキャリア周波数も現時点では GHz オーダーであり、次世代 5G/6G 通信においても 100 GHz を超えることが難しい状況にある。

一方で、テラヘルツ領域の研究のもう一つの方向性として、光技術を用いたアプローチがある。光領域では、その高いフォトンエネルギーを活用して、光によって励起された電流を計測したり、生成する熱を検出したりする。そのためにフォトダイオードやパイロセンサーなど様々な計測素子が存在しており、光強度を調べるために用いられている。また、これらの半導体素子を二次元に並列化することも可能であり、デジタルカメラをはじめとしてイメージング可能な二次元撮像素子が様々な実用化されている。しかしながら、テラヘルツ領域のフォトンエネルギーは、室温のエネルギーよりも小さいため、このような方式でテラヘルツ波を検出しようとする、熱雑音に埋もれてしまうという問題があった。このため、テラヘルツ検出では微小な電流を大きく増幅した

り、差分を高感度に検出したりする手法が必要になり、計測速度が犠牲となる場合が多かった。したがって、テラヘルツ領域で起こる強度の変化をリアルタイムに可視化することはこれまでには実現できていないと言える。

このような中で、我々は超短パルスレーザーを用いたコヒーレントなテラヘルツ波の発生検出手法に着目した。超短パルスレーザーを非線形結晶や光伝導アンテナなどの素子に照射すると、光励起によって超高速の分極や電流の変化が起こり、それによってテラヘルツ波が発生する。また、検出側では、テラヘルツ波と共に超短パルスレーザーが照射され、テラヘルツ電場によって誘起された屈折率変化や電流変化を検出することで、コヒーレントなテラヘルツ波の電場強度に関する情報を得ることができる。この測定手法を検出用のパルスレーザーを照射するタイミングを変えながら計測することで、テラヘルツ領域・ピコ秒領域のパルス波形を得ることができる。このような手法をテラヘルツ時間領域分光法 (THz-TDS) と呼び、物質の超高速ダイナミクスやテラヘルツ応答を調べるために良く用いられている。

しかしながら、この手法には重大な欠点が存在する。THz-TDS ではコヒーレントな電磁波を用いるために、熱励起などの影響は受けずその波形を検出することができるが、時間差を変えながら繰り返し測定するため、繰り返し同様の波形や現象が誘起される場合でなければ、精度よく波形を検出することができない。したがって例えば、時々刻々と揺らぐ現象について調べたい

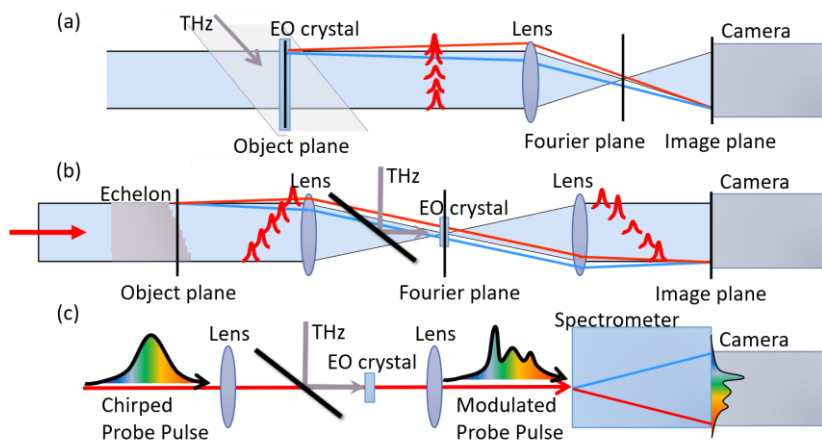


図1：リアルタイムにレーザー1パルス（シングルショット）でテラヘルツ波を検出する主な手法。(a) テラヘルツ波とプローブ光を斜めに交差させる手法。(b) 階段型の光学素子を用いて、検出用の光を分割し、電気光学結晶に集光する手法。(c) チャープパルスを用いて、時間情報を波長にマッピングする手法。

場合には、測定するたびに異なる強度が得られてしまうため、正確な測定を行うことができなくなる。このため、従来の THz-TDS は、繰り返し測定可能な平均的な現象のみが測定対象となってきた。一方で、テラヘルツ領域の波形や、ピコ秒の時間変化を示す現象は必ずしも繰り返し安定的に生じるものばかりではない。

我々は、この点に着目し、レーザーパルス 1 パルスでテラヘルツ波形や超高速波形を一挙に取得しようというシングルショット分光法を研究してきた[1]。図1にそのための計測手法として代表的なものの原理をまとめた[2]。本研究では、これまでに開発してきたこれらの技術を用いて、ピコ秒・テラヘルツ領域の光強度波形、電場波形をリアルタイム計測するシステムを開発し[3]、利得スイッチ半導体レーザーや[4]、テラヘルツ共鳴トンネルダイオードの出力波形計測に適用し[5]、パルス波形の計測に成功したので報告する。用いた手法は、前者については、チャープパルスを用いる分光手法(c)であり、後者については、階段型のミラーを用いてレーザーパルスを分割する手法(b)である。また、ファイバーレーザー技術と組み合わせることによって、堅牢なテラヘルツオシロ

スコープを実現できることを示した。

2. 研究成果

まず、本研究で主に追究したチャープパルスを用いて超高速波形を計測した手法及びその結果について述べる。超短パルスレーザーは極めて短いパルス幅を持つことからそのフーリエスペクトルは広帯域である。チャープパルスとは、この様々なスペクトル成分が別々の時間に到達することによってパルス幅が長くなった状態のことを指し、超短パルスレーザーを用いた実験において極めて重要な概念である。図2の左上に示したように、時間が経つにつれて中心周波数に変化していくパルスがチャープパルスである。

チャープパルスは、スペクトル位相の周

波数依存性に周波数の二次に比例する成分が入ることによって表現できる。すなわち、光のスペクトル振幅

$A(\omega)$ 、周波数 ω とした時、光パルスの電場波形は、

$$E(t) = \int d\omega A(\omega) e^{-i\omega t + iat^2}$$

である。このとき位相項の iat^2 がスペクトル成分ごとに到達時間が異なることを表している。この値の正負によって、光の周波数が時間的に上昇していくか、下降していくかを変えることができる。

これをテラヘルツ波や超高速応答のプローブとして用いた際には、時間的に変化する現象が光パルスの異なる波長によってプローブされるために、時間情報が波長にマッピングされることになる。そうすると、光パルスのスペクトルを見れば実効的に超高速領域の時間波形を見ていることにつながるため、単一の光パルスであってもそのスペクトル形状を測定することができれば、時間領域の情報を得ることができる。チャープパルスのパルス幅は制御することができるので、実際に観測できる時間幅もそれによって制御できる。

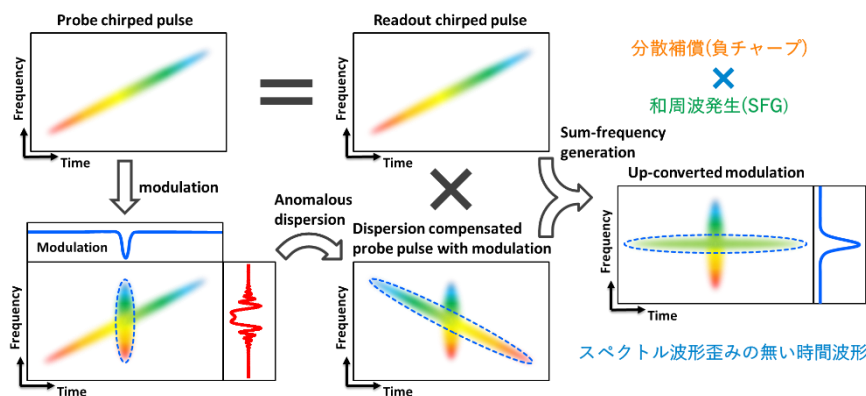


図2：分散補償チャープパルス分光法の原理。プローブのチャープパルス（左上）に変調を書き込むと、スペクトル領域では左下図の右赤線のようにになる。これを位相補償し中下図のようにした上で、中上図のチャープパルスと和周波を取ると、右図のような時間周波数スペクトルを得ることができる。これをスペクトル（横）方向で見ると干渉は生じず、右青線のように元の変調波形に対応した歪みのない波形を得ることができる。

このような手法は非常に簡便であることから古くから研究され、テラヘルツ波や超高速現象の分光に数多く用いられてきた。しかしながらこの手法には、特に高い時間分解能が必要な時に、スペクトルで計測した波形が大きくゆがむという問題点があった。通常時間領域の分光法では、パルスの光がすべての光が位相の揃った状態で利用されるため（すなわちチャープがない、最も短いパルス幅の状態）、高い時間分解能を有すると考えられる。一方でチャープパルスを用いると、ある時間を計測するために利用できる光のスペク

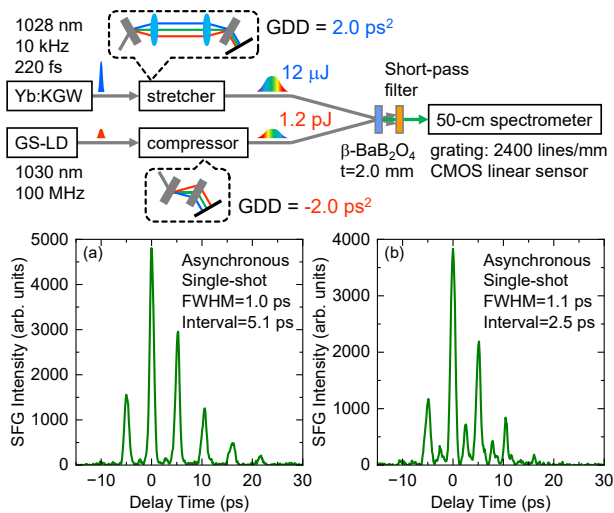


図3：利得スイッチレーザー（GS-LD）のパルス波形計測。上図に示したように、1 μm のフェムト秒パルスレーザーを用いて位相補償をした上で、GS-LD の出力波形を計測した。(a) (b) 非同期で計測した出力パルス波形の一例。

トル幅が、パルス全体のスペクトル幅よりも狭くなるため、得られる情報としてはその狭くなったパルス幅の時間分解能しか得られないのではないかと、ということになる。このような考察から、チャープパルスを用いたシングルショット分光法の時間分解能 Δt は、そのスペクトル幅で可能な最短パルス幅 T_{TL} （チャープ 0 の状態）と用いるプローブの窓幅 T_w を用いて、

$$\Delta t = \sqrt{T_{\text{TL}} T_w}$$

であると考えられてきた。すなわち、長い時間を見ようとして窓幅（チャープパルスのパルス幅 T_w ）を大きくするとどんどん時間分解能 Δt が悪くなる（長くなる）わけである。

我々をはじめいくつかのグループは、このような限界を打破するために、図2に示したような位相補償と和周波発生が利用できることを明らかにした[3]。上記の議論は、時間分解能を強度プロファイルの幅としてのみ取り扱っているが、実際には光パルスと超高速な変調それぞれをスペクトル領域もしくは時間領域で取扱い、その波形変化をシミュレーションすべきである。その結果、時間分解能の悪化は、超高速変調による信号とチャープパルスの干渉によって生じており、それによって、振動型の変調がかかってしまうことが分かった。これを補償するために図2に示したように、計測に使用したチャープパルスを一旦位相補償し、元のチャープパルスとの和周波を取ることにによって、図2右図のように、時間領域の情報を周波数領域に1対1で対応させることが可能となる。この手法を用いると、テラヘルツ波による変調波形や光パルスの超高速波形を、ゆがみなく周波数領域でシングルショット計測することが可能となる。

このような手法を用いて、利得スイッチレーザー(GS-LD)と言われるピコ秒パルスを発生させることのできる半導体レーザーを計測し、その出力波形を超高速領域で評価した[4]。図3はその実験系と評価結果を示す。図3上図に示したように、波形計測には Yb 系のパルスファ

イバーレーザーを使用し、回折格子対を用いてチャープパルスとすることで読み出し光として使用した。GS-LD の出力パルスは、読み出し光と逆で同量のチャープを付与し、非線形結晶 $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ において読み出し光との和周波数を取得した。和周波光は、ショートパスフィルダーで基本波をカットし、信号のみを分光器で波長分解してスペクトルを計測している。図2の右端に示したように、このような配置を用いると、スペクトル波形がそのまま時間軸に対応するような計測が実現できる。

図3(a)、3(b)はこのような計測で得られた典型的な出力パルス波形である。通常の超高速計測で二台のレーザーを用いる場合には、二つのレーザーを精密に同期する必要があるが、本研究で用いた波形計測手法はレーザー1パルスで計測が終了するシングルショット計測手法であることから、同期する必要なく計測を行うことが可能である。その結果、図に示したように、GS-LD からの出力は ps 程度のパルス幅を持つ光パルスが多数放出されている、パルス列であることが分かった。また、その出力は、パルスごとに大きく異なっていることが分かった。通常のパルス波形計測では、パルスごとに異なる波形が出力されている場合、その平均波形のみが計測されることが多いが、本手法では、個別の波形を計測できることから、より多くの情報を得ることが可能になる。

さらに、タイミングが合って発生した和周波光を多数回測定し、強度が最も高いタイミングを 0 ps として波形の時間軸を揃えた結果、これらの 5.1 ps のパルス列間隔が、再現性良く観測されることが分かった。この間隔は、用いた半導体レーザーのキャビティ長に対応することが分かっており、利得スイッチングによる光パルスが、1 ps を切るパルス幅を実際に有しており、キャビティ内で超短パルス発振が実現されていることを、時間領域ではじめて明らかにしたものである。

このように、チャープパルスを用いたシングルショット波形計測手法が GS-LD のような比較的強度の弱い光の計測にも活用できることは、本手法が、様々な光源の超短パルス波形計測へと応用できる技術として期待できることを示している。そこで、このような応用を実証しやすくするために、計測システムをファイバーベースとし、堅牢な光学系を実現することを目指した。チャープパルスを用いたシングルショット分光法は、図1に示した手法の中でも、光の内部自由度である波長に時間情報をマッピングするという意味で、特徴的である。このおかげで、計測時に必要なものはスペクトル測定のみであり、精密なイメージング光学系を構築する必要がない。したがって、ファイバーレーザー技術との組み合わせや顕微分光などが可能となる。

図4はそのために構築した、ファイバーベースの超高速波形計測モジュールのプロトタイプである。波形計測のためには読み出し光として超短パルスレーザーが必要であるが、それと、実際の被測定光をファイバーで入力し、それらの位相補償をした上で、和周波光を発生させ、スペクトル計測する構成としている。図に示してい

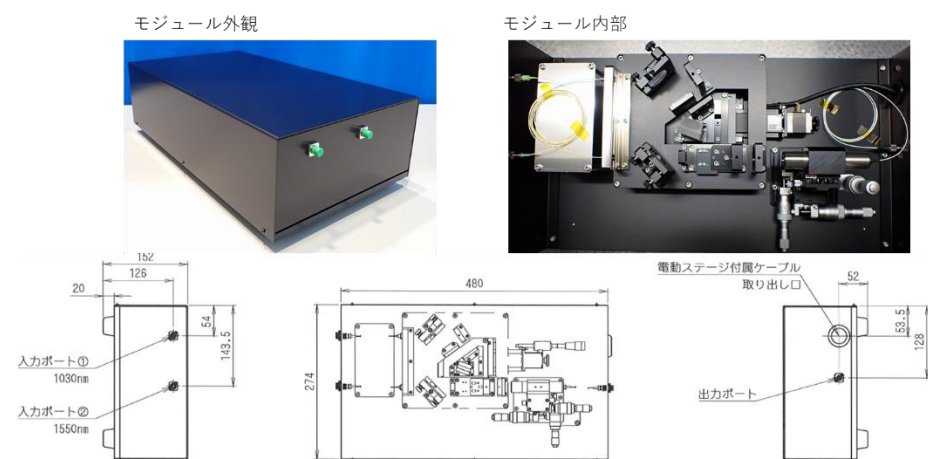


図4：ファイバーベースのリアルタイム波形計測モジュール。写真に示したように、図3の光学系を $W480 \times D274 \times H152 \text{ mm}^3$ のフットプリントで実現することが可能である。

るように、比較的小さなフットプリントでモジュールを構成することが可能であり、将来的に、超短パルスレーザーおよび小型分光器と組み合わせることによって、高感度かつ広帯域の超高速計測が実現できる。今後は、和周波発生させる非線形光学結晶をより高効率な周期分極反転 LiNbO₃ 導波路等を用いて置き換え、光増幅器などとの組み合わせを可能にすることで、計測の高感度化を進め、より使いやすい波形計測システムを実現していくことが肝要である。

次に、同じく半導体デバイス

ではあるが、テラヘルツ波の出力が可能な共鳴トンネルダイオード(RTD)を計測した結果を図5に示す[5]。この研究では、現時点で最も高感度な計測が可能な図1(b)、階段状の光学素子を用いた手法で出力テラヘルツ波の計測を行った。図2とは異なり、反射型の階段状光学素子を用いることで、シングルショットの波形計測を可能にしている。また、計測においては、プローブ光を二つに分け、正負逆向きの位相オフセットをつけて、クロスニコル計測することによって、高感度かつ線形にテラヘルツ波形を計測できる手法を用いた。

図5に本手法を用いて計測した出力テラヘルツ波形の例を示している。この出力は、RTDに印加する電圧を意図的にON/OFFし、その瞬間にどのような波形が観測できるかを調べたものである。定常電圧を印加した場合の電場波形検出では、0.1 V/cm程度の振幅の正弦波の波形が観測できるが、デバイス電圧が動的に変化するタイミングでは、図5に示したような1 V/cmに達する電場強度を持ったテラヘルツ波が発生していることが分かった。図の上側がその電場波形に対応している。

このテラヘルツパルスの周波数の時間依存性を調べるために、得られた波形をウェーブレット変換し、各時間における周波数スペクトルを算出したのが下図のカラーマップである。このカラーマップにおいては、縦軸が周波数、横軸が時間であり、色が濃い部分でテラヘルツ波の振幅が存在することを示している。このRTDは0.24 THz程度で発振するデバイスであるが、このカラーマップからも分かるように、0.1 THzから0.6 THz程度の極めて広い範囲でテラヘルツ波の発振が観測できていることがわかる。さらに、得られたテラヘルツパルスの中心周波数は時間的に変化しており、タイミングによってその傾きが異なることや、一旦周波数が下降した後に反転し、上昇するパルスが得られていることがわかる。また、最下段の図からも分かるように、二つの成分が同時に発振する場合もあることが分かった。

これらの結果は、デバイスに印加する電圧を高速に変

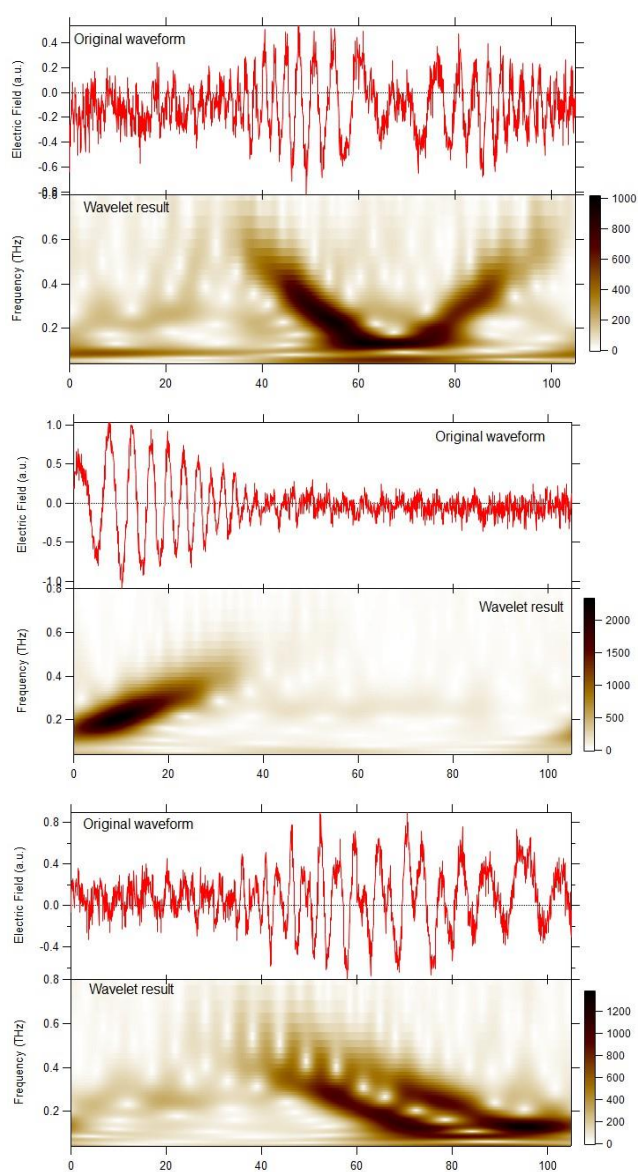


図5：三つの異なるタイミングで計測された出力テラヘルツ波形。周波数が時間的に変化するパルスが、デバイスをON/OFFした際に出力されていることが分かった。横軸は時間(ps)。

化させ、その状態が動的に変化する際に、テラヘルツ波の発振が大振幅で起こり得る条件があることを示している。通常 RTD の発振周波数は、デバイスの持つインダクタンスとキャパシタンスの積の平方根で表すことができるが、デバイス電圧が急激に変化する際には、その非線形性によってキャパシタンスが大きく変化し、発振周波数が動的に変化しているものと考えられる。このようなメカニズムは、GS-LD においても報告されているものであり、テラヘルツパルスを得るための新しい手法として期待できる。今後は、このような発振条件が実現される動作条件を明確にするために、より速い電圧変調を印加できるようにし、その結果現れる出力を調べていく必要がある。

このような結果は、デバイスの ON/OFF 時にのみ現れるものであるために、リアルタイムの計測が可能で、テラヘルツオシロスコープ技術によってのみ明らかにできるものである。GS-LD や RTD におけるこれらの興味深い結果は、テラヘルツオシロスコープ技術がテラヘルツ波や光デバイスの計測だけではなく、超高速制御を行うために極めて有力なツールであり、必要不可欠なものであることを示している。

以上に述べたように、本研究では、チャープパルスを用いたリアルタイムテラヘルツオシロスコープ技術を開発し、ファイバーベースの技術と組み合わせることが可能であることを示してきた。また、開発した技術が GS-LD や RTD における、光出力、テラヘルツ出力の計測に使用可能であることを示してきた。これらの結果は、テラヘルツオシロスコープがデバイスの超高速応答を活用したデバイスを実現する上で重要な知見をもたらすことを示している。

【参考文献】

- [1] Y. Minami et al., "Single-Shot Measurement of a Terahertz Electric-Field Waveform Using a Reflective Echelon Mirror," Appl. Phys. Lett. **103**, 051103: pp. 1-4 (2013).
- [2] I. Katayama and R. Tamaki, "Singleshot and high-sensitivity detection of terahertz waveforms using phase-offset electro-optic sampling and an echelon mirror," Proc. SPIE **12406**, 1240603.
- [3] R. Tamaki et al., "Ultrafast pump-probe spectroscopy via chirped-pulse up-conversion with dispersion compensation," Opt. Exp. **31**, pp.40142-40150 (2023).
- [4] R. Tamaki et al., "Ultrashort gain-switched pulse trains from laser diodes characterized by single-shot up-conversion time microscope," Appl. Phys. Exp. **18**, 082002 (2025).
- [5] R. Tamaki et al., "Realtime visualization of transient terahertz waveforms emitted from a resonant tunnelling diode," submitted.

【研究成果】

<原著論文> (抜粋)

1. R. Tamaki et al., "Ultrafast pump-probe spectroscopy

via chirped-pulse up-conversion with dispersion compensation," Opt. Exp. **31**, pp.40142-40150 (2023).

2. R. Tamaki et al., "Ultrashort gain-switched pulse trains from laser diodes characterized by single-shot up-conversion time microscope," Appl. Phys. Exp. **18**, 082002 (2025).

【口頭発表】 (抜粋)

1. 玉置亮、小林真隆、中前秀一、金昌秀、伊藤隆、秋山英文、片山郁文、『シングルショット分光法を用いた利得スイッチレーザーの超高速パルス波形とジッター評価』、15a-K308-5、第 72 回応用物理学会春季学術講演会（東京理科大・野田キャンパス、2025 年 3 月 14 日－17 日）。
2. 分玉康太、高橋洸矢、玉置亮、有川敬、片山郁文、『シングルショット検出による連続波テラヘルツ光源の電場波形計測』、A06-22a-VI-04、レーザー学会学術講演会第 45 回年次大会（広島市、2025 年 1 月 21 日－23 日）
3. A. Maeshiro, R. Tamaki, J. Takeda, I. Katayama, "Performances of Chirped-Pulse Single-Shot Ultrafast Spectroscopy with Dispersion Compensation," Tu-29, International School and Symposium on Nanodevices and quantum Technologies (ISNTT 2024), (Atsugi, 2-6 December, 2024).
4. R. Tamaki, K. Takahashi, T. Arikawa and I. Katayama, "Single-shot terahertz waveform detection of resonant tunneling diode in time-domain," 49th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), (Perth, Australia, 1-6 Sept. 2024).
5. R. Tamaki, M. Fukuoka, I. Morohashi, I. Katayama, "Ultrafast Detection of Pulse Profiles via Chirped-Pulse Up-Conversion," ALPS14-04, Optics and Photonics International Congress (Yokohama, Japan, 22-26 April 2024).

【特許等】

1 件