

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：12701
研究種目：挑戦的萌芽研究
研究期間：2015～2016
課題番号：15K13378
研究課題名(和文) シングルショットテラヘルツオシロスコープの開発

研究課題名(英文) Singleshot Terahertz Oscilloscope

研究代表者

片山 郁文 (Katayama, Ikufumi)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：80432532

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では、テラヘルツ、ピコ秒領域の時間波形をリアルタイムに計測する技術を開発するために、波長ごとに時間差(チャープ)を付けた超短パルスレーザーと、群速度分散を用いて時間波形をナノ秒領域にまで伸長する技術を組み合わせることを試みた。その結果、シングルショットで波形を取得することに成功し、光誘起相変化材料や、光非線型応答、テラヘルツ電場波形のシングルショット検出に成功した。また、チャープファイバーブラッググレーティングと呼ばれる分散素子を用いることで、高感度に、高い信号雑音比で波形を得ることに成功した。これらの結果は、本手法がテラヘルツ領域の波形計測手法として非常に期待できることを示している。

研究成果の概要(英文)：In order to observe terahertz and picosecond waveforms in real time, we developed a setup for singleshot terahertz oscilloscope by combining the spectral encoding technique with the time-stretching method using a chirped ultrashort laser pulse. Using this setup, we succeeded in measuring ultrafast phase change in chalcogenide metal alloys, nonlinear optical response of lithium niobate, and terahertz waveforms in real time. We also revealed that when we used a dispersive optics called chirped fiber bragg grating, the signal to noise ratio of the measurement, and the measurement speed after the event become much higher than that obtained by using the long optical fiber. The results indicates the promising capability of the method, and will be used in the future ultrafast spectroscopy, and ultrafast signal processing.

研究分野：光物性物理学

キーワード：テラヘルツ シングルショット 超高速分光 時間領域伸長法

1. 研究開始当初の背景

超高速分光法は、物質の超高速のダイナミクスを測定するための有効な手法であるが、通常はポンプ光とプローブ光の間の時間遅延を掃引しながら測定を行うため、繰り返し測定が必要であるという欠点があった。したがって、一回限りの現象、例えば、光誘起相変化や、光化学反応、破壊現象、カオス的な現象等、多くの興味深い現象の超高速ダイナミクスを測定することは極めて難しかった。このような点を解決するために、多くのシングルショット分光手法が提案されてきたが、二次元のカメラを用いることが多かったため、測定データの読み出しに時間がかかり、通常は 1 kHz 以上の高繰り返しで、シングルショット超高速分光測定を行うことは困難であった。特にマルチタイムスケールで物質のダイナミクスを測定したい場合には、物質のフェムト秒のダイナミクスが、ミリ秒、マイクロ秒でどのように変化するかを明らかにする必要があり、このような条件を満足する測定手法がないというのが研究開始当初の背景であった。

2. 研究の目的

そこで、本研究では、高繰り返しでシングルショットの超高速分光法、テラヘルツ電場測定を行うことのできる新規手法を開発することを目的として研究をおこなった。そのために、超短パルスレーザーのパルス幅を波長分散させることで意図的に伸長させ、EO 結晶において、各波長成分とテラヘルツ波を相互作用させることで、時間情報を波長にマッピングさせた。さらに、長距離ファイバーを透過させることで、群速度分散を利用して各波長成分を時間方向で大きく引き伸ばし、通常のおシロスコープでも検出可能なマイクロ波領域にテラヘルツ領域の情報を落とす。これによって、通常のおシロスコープでもテラヘルツ波の電場波形の検出が可能とした。これによって、テラヘルツパルスを単一フォトダイオードとおシロスコープで検出できるようになり、高速テラヘルツ波形検出の新規手法として応用が期待される。

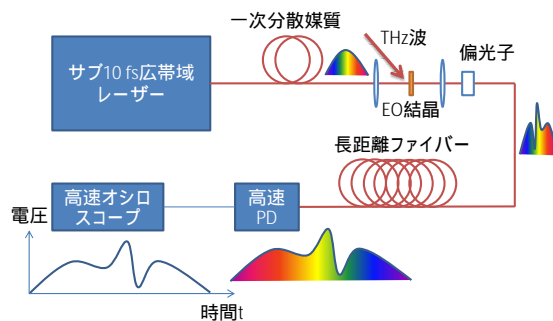


図 1: テラヘルツオシロスコープの原理図。テラヘルツ電場波形をチャープパルスに書き込み、ファイバーを用いて時間領域で伸長することで、高速 PD とオシロスコープによるアナログのシングルショットベース電場検出を可能にする。

3. 研究の方法

このような研究を行うために、本研究では、再生増幅型の Ti:sapphire 超短パルスレーザーを用いて、テラヘルツ波を発生させ、SF11 と呼ばれるガラスのロッドを通すことによって、プローブ光をチャープさせることによって、時間情報の波長へのマッピングを行った。また、透過したプローブ光はチャープファイバースラッググレーティングなどを通してナノ秒領域へ伸長し、それをフォトダイオードとおシロスコープを利用して検出することで、テラヘルツ電場波形に関する情報を得ることを試みた。また、テラヘルツ電場測定以外にもテラヘルツオシロスコープが応用できることを示すために、光ポンププローブ分光法のシングルショット、高繰り返しでの検出も試みた。

4. 研究成果

本研究では、テラヘルツオシロスコープ技術を実証・改良するために、用いる波長やパルス幅、分散媒質の種類、チャープ量などを各種検討し、最適な実験条件を探索した。以下ではまず、特にテラヘルツ発生によく用いられる 800 nm の波長帯で行った実験結果について述べることで、本技術の広範な応用可能性を示した後、最終的に分散媒質として極めて良い特性を示す、チャープファイバースラッググレーティング、通信帯域で検討を行った結果について述べる。

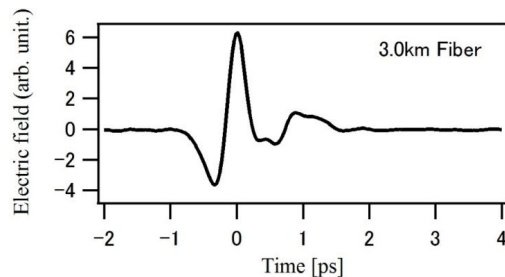


図 2: 3 km ファイバーを用いたテラヘルツオシロスコープによって測定した電場波形。

まず、研究開始時に現有していた 1.5 μm 用の 3.0 km 長距離ファイバーを分散媒質として用い、800 nm のレーザーと 1 GHz オシロスコープを用いた検出実験をおこなった。その結果を図 2 に示す。これはテラヘルツ波を ON、OFF をしながらプローブ光の波形を測定し、その差分をとることで電場波形としたものである。電場強度とするために規格化を行い、時間軸はテラヘルツパルスの照射タイミングを一定量変化させることで校正した。テラヘルツ電場パルスの波形が明瞭に観測されていることがわかる。なお、1 ps 程度の部分に肩があるが、この構造は、用いたファイバーが 800 nm に対してシングルモードではないために現れているものであることが分かっており、シングルモードのファイバーを

利用することによって解消することができる。また、光強度を検出するフォトダイオードとオシロスコープを高速なものに変えることで、より細かい信号が検出できるようになることもわかっている。これらのことから、テラヘルツ電場波形を単一のフォトダイオードとオシロスコープで検出できることが実証できたことが分かる。この手法は、フォトダイオードを二個利用するバランス検出法と組み合わせることも可能であり、より高感度、高分解能なテラヘルツ電場波形の取得に応用できる。

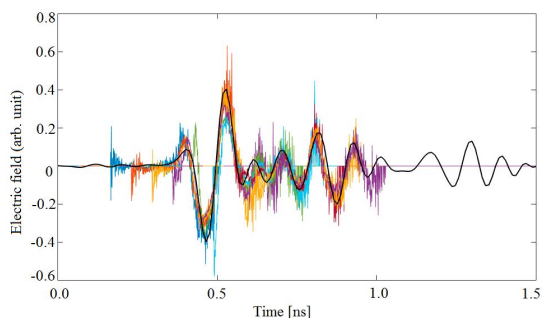


図 3 : 1.2 μm レーザーを用いたテラヘルツオシロスコープの測定結果。黒線は通常のステージスキャン法によって測定した波形であり、各色は、テラヘルツとプローブ光の時間遅延を 1 ps ずつ変化させたものである。これらの波形は高い精度で一致していることが分かる。

さらに、今回用いたテラヘルツオシロスコープの手法が、通信帯域でも有効であることを示すために、同様に 1.5 μm 用の長距離ファイバーを用いて、レーザーの波長を変化させた場合のデータを図 3 に示す。この測定では、光パラメトリック増幅器を用いて、レーザーの波長を 1.2 μm に変えて用いた。当然予想されることではあるが、中心波長によってファイバーの持つ群速度分散が異なるため、長距離ファイバーを通した後のパルス幅は変化する。通信帯域では、分散がほぼ 0 となるため、効率的にパルス幅を伸長できないので、より短波長である 0-band、1.2 μm 帯での実験をおこなった。テラヘルツ波の発生は、OH1 と呼ばれる有機非線形結晶を用いた。図の黒線は通常の方法で測定した電場波形であり、他の色の線は、それぞれシングルショットで得た波形である。横軸は伸長した後の時間となっている。それぞれの色は、テラヘルツ波とプローブ光の時間遅延を変化させたものである。この図を見ると分かるように、用いたファイバーのカットオフが 1.2 μm でシングルモードとなるため、図 2 で観測された波形のゆがみは観測されず、テラヘルツ波形とシングルショットで得た波形がよく一致していることが分かる。このことは、ファイバーがシングルモードでありさえすれば、テラヘルツオシロスコープの原理は各波

長で適用可能であり、汎用性の高い測定手法となりうることを示している。

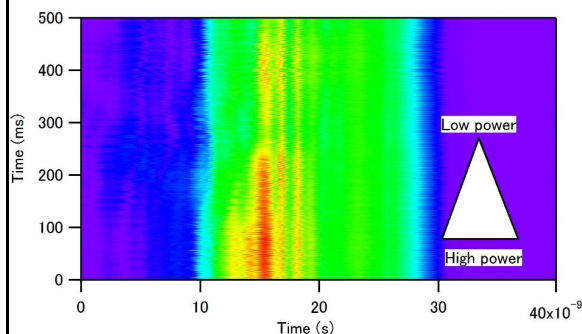


図 4 : テラヘルツオシロスコープを用いて測定した LiNbO_3 における Kerr 回転の時間依存性。縦軸は測定時間であり、1 秒間に測定される 1000 本のデータが、カラースケールでプロットされている。右挿入図に示したようにポンプ光強度を時間的に変化させているので、ポンプ光強度が弱まるに従い、16 ns 近傍の信号が減少していることがわかる。このように、ポンプ光強度依存性を 1 秒で取得することができる。

さらに、本テラヘルツオシロスコープの手法が高い繰り返しの測定にも適用可能であることを示すために、オシロスコープの Fast Frame モードを利用して、超高速波形を 1 秒にわたってモニターすることを試みた。用いたレーザーの繰り返し周波数は 1 kHz であるため、この間に 1000 本の波形を得ることができることになる。1 秒の間に変化を生じさせるために、ポンプ光の強度を、自動回転ステージを利用して変化させる測定を行った。その結果を図 4 に示す。この測定では、時間が経つほどにポンプ強度が小さくなる設定となっており、それに応じて、10 ns 付近に現れるピークの強度が小さくなることが分かった。このように 500 点ものデータ点を有するポンプ光強度依存性が 1 秒で得られていることは特筆に値する。

次に、開発したシングルショットテラヘルツオシロスコープを通常の方法では難しい、不可逆変化の超高速分光法に適用した結果について報告する。本手法は、不可逆的に変化するような現象であったとしても超高速応答を随時追跡できるため、そのような例として、カルコゲナイト合金における光誘起相変化のダイナミクスを測定した。実験では、これまでと同様に 1 kHz の Ti:sapphire 再生増幅レーザーを利用し、測定の高速度化を図るためにポンプ光強度を一秒間に増加させる設定を行った。その際に、相変化の閾値を超えるようにし、その前後でダイナミクスがどう変化するかをトレースしている。図 5 にその結果を示す。縦軸はフレーム番号であり、横軸はポンププローブの時間遅延である。この結果を見ると、数百フレーム目あたりから超高速応答が変化し始めていることが見

で取れる。また、これと同じ時間から、プローブ光の透過率そのものも変化が始まっており、相変化が起こっていることが理解できる。このような超高速応答の時間変化は、シングルショットオシロスコープの技術を用いて初めて明らかにできるようになったものであり、注目に値する。

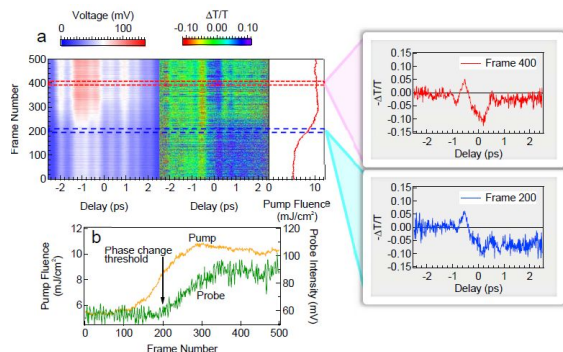


図 5 : (a) 光相変化材料、GeSbTe における超高速応答をテラヘルツオシロスコープによって測定した光誘起相変化のダイナミクス測定結果。縦軸はフレーム数であり、測定中にポンプ強度を増加させ、相変化の閾値近辺の超高速応答を測定した。右図は各フレームで切り出した波形である。(b) ポンプ光強度とプローブ強度の時間変化。ポンプ強度が飽和しても相変化が続く、蓄積効果が観測されている。

次に、800 nm における、長距離ファイバーの吸収の問題問題を避けるために、同様に非常に大きな波長分散を有しながらも、光の透過は短い距離ですむ、チャープファイバブラックグレーティングの利用した結果について報告する。このファイバーはファイバー長方向に屈折率の変調を加えることで、スペクトル内のある波長だけを反射させることができることを利用して、各波長成分が異なる位置で反射するように設計したものである。これによって、ファイバーの距離をそのまま出力パルス幅とすることができ、ファイバー透過による損失を必要最低限に抑制できる。また、同時に長距離ファイバーを透過することによる時間遅れを解消でき、高速にリアルタイム測定を行うことが可能になる。これは例えば、観測した超高速応答をもとに、何らかの処理を加えるといった応用に非常に有用である。例えば、生産ラインにおけるエラー検出を行い、検出信号によってはラインを止めるなどの機動的な応用が可能となる。加えて、通信帯域を含む群速度分散の小さい領域でも利用可能であるなど、そのメリットは極めて大きいと考えられる。

そこで、本研究では、チャープファイバブラックグレーティングを用いたシングルショット分光系の構築を目指した。まず、実証の為光通信帯域であり分散が小さく、また損失も小さい 1.3 μm 帯に注目した。この領域

で、できるだけ広い帯域、かつ高い分散を実現できるような仕様のファイバブラックグレーティングを作成した。実証のための光源としては繰り返し 1 kHz、パルス幅 35 fs、出力 4 mJ のチタンサファイア再生増幅レーザーをポンプ光とする光パラメトリック増幅器を利用した。光源の出力は、1300 nm で約 400 μJ である。この光源の出力を二波長ビームスプリッターでポンプ光 800 nm と、プローブ光 1300 nm に分け、1 mm 厚の ZnTe (110) 単結晶基板に集光した。透過したプローブ光はレンズによってファイバーへ集光し、サーキュレーターを用いてチャープファイバブラックグレーティングからの反射光を取り出し、帯域 5 GHz の高速フォトダイオードによって検出した。信号出力は 12.5 GHz の高速オシロスコープを用いて検出した。サンプル位置でのプローブ光のパルス幅を可変とするために、回折格子対を作成してプローブ光にチャープをつけることによって、プローブできる時間窓を大きくすることを試みた。回折格子間の距離を変えることでチャープを制御することが可能であるが、実際に測定されたパルス幅は、フーリエ限界の数百 fs から、20 ps 程度にまで伸長できていることが分かった。プローブのパルス幅は、検出窓幅に直結するため、窓幅可変のシングルショット超高速分光装置を実現できたことになる。

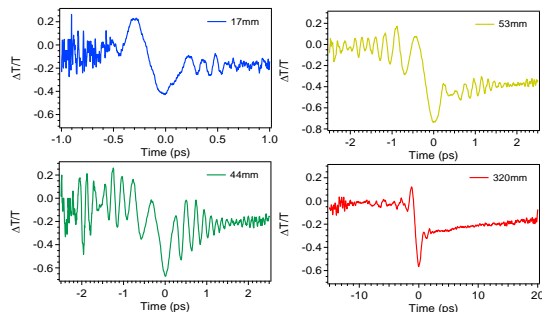


図 6 : 各回折格子間隔で得られたデータを規格化した過渡透過率波形。十分にプリチャープをつけた 320 mm の場合には、滑らかな波形が得られている。

得られた出力パルスを用いて、テラヘルツ時間領域のポンププローブ分光実験を行った結果を図 6 に示す。試料は、ZnTe である。図に示したように、プローブ光のチャープ量に依存して観測される過渡応答の波形が変化することがわかった。特に回折格子間の間隔を 53 mm とした場合は、多数の干渉フリッジが観測されている。これは、時間波形をスペクトルにマッピングする場合に起こる波形歪みに起因するものであり、和周波発生による信号成分と差周波発生による信号成分とが干渉することによって起こっているものと考えられる。一方で、十分にプリチャー

プ量を広げた場合には、このような干渉は見られなくなり、比較的滑らかな波形が得られるようになることがわかった。

以上に述べたように本研究を通して、シングルショットオシロスコープの原理実証と広範な応用可能性を実証することができた。

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9件)

- [1] G. T. Noe, I. Katayama, F. Katsutani, J. J. Allred, J. A. Horowitz, D. M. Sullivan, Q. Zhang, F. Sekiguchi, G. L. Woods, M. C. Hoffmann, H. Nojiri, J. Takeda, and J. Kono, "Single-Shot Terahertz Time-Domain Spectroscopy in Pulsed High Magnetic Fields", *Opt. Exp.* 24, pp. 30328-30337 (2016). 査読有 DOI: 10.1364/OE.24.030328
- [2] K. Yoshioka, I. Katayama, Y. Minami, M. Kitajima, S. Yoshida, H. Shigekawa, and J. Takeda, "Real-Space Coherent Manipulation of Electrons in a Single Tunnel Junction by Single-Cycle Terahertz Electric Fields", *Nature Photonics* 10, pp. 762-765 (2016). 査読有 DOI: 10.1038/NPHOTON.2016.205
- [3] M. Kobayashi, Y. Minami, C. L. Johnson, P. D. Salmans, N. R. Ellsworth, J. Takeda, J. A. Johnson, and I. Katayama, "High-Acquisition-Rate Single-Shot Pump-Probe Measurements Using Time-Stretching Method", *Sci. Rep.* 6, 37614: pp. 1-6 (2016). 査読有 DOI: 10.1038/srep37614
- [4] Y. Minami, K. Horiuchi, K. Masuda, J. Takeda, and I. Katayama, "Terahertz Dielectric Response of Photoexcited Carriers in Si Revealed via Single-Shot Optical-Pump and Terahertz-Probe Spectroscopy", *Appl. Phys. Lett.* 107, 171104: pp. 1-4 (2015). 査読有 DOI: 10.1063/1.4934697
- [5] Y. Minami, K. Araki, T. D. Dao, T. Nagao, M. Kitajima, J. Takeda, and I. Katayama, "Terahertz-Induced Acceleration of Massive Dirac Electrons in Semimetal Bismuth", *Sci. Rep.* 5, 15870 : pp. 1-6 (2015). 査読有 DOI: 10.1038/srep15870
- [6] Y. Ikegaya, H. Sakaibara, Y. Minami, I. Katayama and J. Takeda, "Real-Time Observation of Phonon-Polariton Dynamics in Ferroelectric LiNbO₃ in Time-Frequency Space", *Appl. Phys. Lett.* 107, 062901: pp. 1-5 (2015). 査読有 DOI: 10.1063/1.4928480
- [7] M. Hada, W. Oba, M. Kuwahara, I. Katayama, T. Saiki, J. Takeda, and K. G. Nakamura, "Ultrafast Time-Resolved

Electron Diffraction Revealing the Nonthermal Dynamics of Near-UV Photoexcitation-Induced Amorphization in Ge₂Sb₂Te₅", *Sci. Rep.* 5, 13530: pp. 1-9 (2015). 査読有 DOI: 10.1038/srep13530

- [8] J. Takeda, Y. Minami, and I. Katayama, "Time-Frequency Two-Dimensional Imaging Spectroscopy Using a Reflective Echelon Mirror", *Rev. Laser Eng.* 43, pp. 208-212 (2015) (in Japanese). 査読有 DOI: 10.1063/1.4886969
- [9] K. Yoshioka, Y. Minami, K. Shudo, T. D. Dao, T. Nagao, M. Kitajima, J. Takeda, and I. Katayama, "Terahertz-field-induced Nonlinear Electron Delocalization in Au Nanostructures", *Nano Letters* 15, pp. 1036-1040 (2015). 査読有 DOI: 10.1021/nl503916t

[学会発表](計22件)

- [1] I. Katayama, M. Kobayashi, Y. Minami, J. Takeda, C. L. Johnson, P. D. Salmans, N. R. Ellsworth, and J. A. Johnson, "Single-shot Terahertz Detection Using a GHz Bandwidth Oscilloscope", 41st International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2016), M4B.4 (25-30 September 2016, Copenhagen, Denmark).
- [2] T. Kuribayashi, Y. Shiozawa, Y. Minami, I. Katayama, and J. Takeda, "Real-Time Mapping of High-Frequency Phonon-Polariton Dispersions in Ferroelectric LiNbO₃", 41st International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2016), T3D.5 (25-30 September 2016, Copenhagen, Denmark).
- [3] M. Kobayashi, J. A. Johnson, Y. Minami, C. L. Johnson, P. D. Salmans, N. R. Ellsworth, J. Takeda, I. Katayama, "Fast-Frame Single-Shot Acquisition of Ultrafast Waveforms", International Conference on Ultrafast Phenomena 2016, UTh4A.28, (17 - 22 July, Santa Fe, USA).
- [4] 栗林知憲、南康夫、嵐田雄介、片山郁文、武田淳、『強誘電体フォノンポラリトン波束の実時間伝播ダイナミクス』、18pB14-2、日本物理学会第72回年次大会(3月18日、大阪大学、大阪)
- [5] 小林真隆、J. A. Johnson、嵐田雄介、南康夫、武田淳、片山郁文、『ブラッグ回折チャープファイバーを用いたシングルショット分光』、16p-311-13、第64回応用物理学会春期学術講演会(3月16日、パシフィコ横浜、神奈川)。
- [6] 小林真隆、Jeremy A. Johnson、嵐田雄介、南康夫、武田淳、片山郁文、『高繰り返しシングルショット分光を用いた超高速光誘起現象の測定』、N-8、第12回ナ

- ノテク交流シンポジウム(2017年3月7日、横浜市大)
- [7] 小林真隆、J. A. Johnson、南 康夫、武田 淳、片山郁文、『光誘起相変化材料の高繰り返しシングルショット分光』、2aB7、日本光学会年次学術講演会(11月2日、筑波大学東京キャンパス)。
- [8] 栗林知憲、南 康夫、片山郁文、武田 淳、『シングルショット分光法を用いた強誘電体フォノンポラリトン実時間波形の温度依存性』、2aB8、日本光学会年次学術講演会(11月2日、筑波大学東京キャンパス)。
- [9] 羽田真毅、仁科勇太、林 靖彦、徳永智春、腰原伸也、一柳光平、野澤俊介、足立 伸一、片山郁文、鈴木貴之、南 康夫、武田 淳、『酸化グラフェンの光還元による sp³ から sp² への構造ダイナミクス』、14aAL-2、日本物理学会 2016 年秋季大会(9月14日、金沢大学)。
- [10] 藤原光る、堀内康平、南 康夫、齋木敏治、桑原正史、片山郁文、武田 淳、『カルコゲナイド半導体薄膜における相変化ダイナミクスのシングルショット THz 分光』、14pAL-6、日本物理学会 2016 年秋季大会(9月14日、金沢大学)。
- [11] 片山郁文、小林真隆、南 康夫、Jeremy A. Johnson、武田 淳、『高繰り返しシングルショット分光による不可逆ダイナミクス計測』、14pAL-11、日本物理学会 2016 年秋季大会(9月14日、金沢大学)。
- [12] 三宅智也、村上寛虎、溝手翔太、與田将士、羽田真毅、西川 亘、山下善文、林 靖彦、鈴木貴之、南 康夫、片山郁文、武田 淳、『鉛ハライドペロブスカイト太陽電池の光劣化ダイナミクス』、14a-C32-2、応用物理学会秋季学術講演会(9月14日、朱鷺メッセ、新潟)。
- [13] 鈴木貴之、片山郁文、南 康夫、進藤怜史、須藤祐司、齋木敏治、武田 淳、『GeCu₂Te₃ の非熱的相変化のシングルショット実時間イメージング』、14a-C32-4、応用物理学会秋季学術講演会(9月14日、朱鷺メッセ、新潟)。
- [14] 小林真隆、J. A. Johnson、南 康夫、武田 淳、片山郁文、『超高速光誘起現象の高繰り返しシングルショット分光』、14p-C32-4、応用物理学会秋季学術講演会(9月14日、朱鷺メッセ、新潟)。
- [15] Y. Minami, K. Masuda, K. Horiuchi, M. Kitajima, J. Takeda, and I. Katayama, "Long-lived Photoexcited Carriers in Si Revealed via THz Single-shot Spectroscopy", The 9th International Symposium on Ultrafast Surface Dynamics, (May 25-29, 2015, Lake Biwa, Japan, Oral).
- [16] I. Katayama, K. Masuda, K. Horiuchi, Y. Minami, and J. Takeda, "Terahertz Response of Long-lived Photoexcited Electrons in Silicon Observed Using Single-shot Terahertz Spectroscopy", The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2015), STu4H.4 (May 10-15, 2015, San Jose, USA, Oral).
- [17] J. Takeda, Y. Minami and I. Katayama (Invited Talk), "Broadband Single-Shot Spectroscopy Applicable to Photoinduced Nonlinear Dynamics", Korea-Japan Joint Symposium on Semiconductor Physics and Nanophotonics, (22 April 2015, Daejeon, Korea, Oral).
- [18] 小林 真隆、ジェレミー A. ジョンソン、南 康夫、武田 淳、片山 郁文、『チャープパルスを用いたシングルショットテラヘルツ分光法の開発』、29aC9、日本光学会年次学術講演会(10月29日、筑波大学東京キャンパス)。
- [19] 堀内 康平、南 康夫、片山 郁文、武田 淳、『シングルショット・光ポンプ・テラヘルツプローブ分光法による GeTe の構造変化解明』、P10、日本光学会年次学術講演会(10月29日、筑波大学東京キャンパス)。
- [20] 栗林知憲、片山郁文、南 康夫、武田 淳、『強誘電体 LiNbO₃ における高周波フォノンポラリトン波束の量子制御』、18pPSA-41、日本物理学会 2015 年秋季大会(9月18日、関西大学)。
- [21] 羽田 真毅、大庭 航、桑原正史、片山 郁文、齋木敏治、武田 淳、中村一隆、『フェムト秒電子線回折法で見る近紫外光照射による Ge₂Sb₂Te₅ の非熱的アモルファス化』、16aCF-10、日本物理学会 2015 年秋季大会(9月16日、関西大学)。
- [22] 羽田 真毅、大庭 航、桑原正史、片山 郁文、齋木敏治、武田 淳、中村一隆、『フェムト秒電子線回折法で見る近紫外光照射による Ge₂Sb₂Te₅ の非熱的アモルファス化』、13a-2G-1、応用物理学会秋季学術講演会(9月13日、名古屋国際会議場)。
- 〔その他〕
<http://www.ultrafast.ynu.ac.jp/>
<http://www.laser-nanoscience.ynu.ac.jp/ja/>
6. 研究組織
 (1) 研究代表者
 片山 郁文 (KATAYAMA IKUFUMI)
 横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授
 研究者番号：80432532
 (2) 研究分担者
 なし
 (3) 連携研究者
 なし
 (4) 研究協力者
 なし