

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月13日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04001

研究課題名(和文) 超広帯域シングルショット分光：限界駆動下における非線形光学応答の可視化と制御

研究課題名(英文) Broadband single-shot spectroscopy: visualization of nonlinear optical responses under extremely driving fields

研究代表者

武田 淳 (TAKEDA, Jun)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：60202165

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円

研究成果の概要(和文)：極限励起・限界駆動下で現れる物質の相変化ダイナミクスや非線形キャリア応答を実時間で可視化し最適制御することは、21世紀の物性研究・ナノフォトニクス研究の最優先課題の1つである。そこで本研究課題では、広帯域シングルショットポンプ・プローブ分光法を開発し、開発した分光手法を駆使して、光記録メディアに使われているカルコゲナイド薄膜の結晶相からアモルファス相への不可逆相変化ダイナミクス及びディラック電子系の伝導電子の非線形光学応答を明らかにした。これらは、将来の超高速ナノフォトニクス、エレクトロニクスに資する成果である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の超高速レーザー分光は、ポンプ光・プローブ光間の遅延時間を変えながら繰り返し測定を行う必要があるため、極限励起・限界駆動下で現れる物質の相変化ダイナミクスや非線形キャリア応答を実時間で可視化し最適制御することは困難であった。本研究により構築した広帯域シングルショット分光技術は、これまで不可能だった不可逆光反応ダイナミクスや極限励起・限界駆動下で現れる非線形光学特性をシングルショットで検出できるので、光科学分野の学術的進歩に多大な貢献するものと期待できる。また、これらの非線形光学応答の解明は、次世代の集積ナノデバイスやプラズモニックデバイス創生などの応用研究にとっても極めて重要である。

研究成果の概要(英文)：Real-time observation of nonlinear carrier dynamics and phase-change dynamics is one of the top-priority issues for future applications in the fields of nanophotonics and nanoelectronics. In this study, we have developed a broadband single-shot pump-probe spectroscopy to observe nonlinear and irreversible phenomena under extremely high driving fields. Using this new spectroscopic tool, we successfully reveal the irreversible crystalline-to-amorphous phase-change dynamics in chalcogenide alloys and THz-field-induced nonlinear carrier multiplication processes via Zener tunneling in Dirac electron systems, which are useful for future developments in nanophotonics and nanoelectronics.

研究分野：光科学、ナノフォトニクス

キーワード：シングルショット 限界駆動 超高速分光 テラヘルツ エシエロン 相変化材料 ディラック電子

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

1. 研究開始当初の背景

極限励起・限界駆動下で現れる物質の相変化ダイナミクスや非線形キャリア応答を実時間で可視化し最適制御することは、21世紀の物性研究・ナノフォトニクス研究の最優先課題の1つである。パルス波形整形技術を組み込んだフェムト秒ポンプ・プローブ分光法は、生体系の光捕集機能の量子制御 (*Nature* **417**, 533, 2002; *Science* **326**, 263, 2009) やカーボンナノチューブのカイラリティ制御 (*PRL* **102**, 037402, 2009) など、物性制御に関する多くの成果に貢献してきた。また、高強度テラヘルツ (以降 THz) 波を用いたポンプ・プローブ分光の進展に伴い、超伝導体のヒッグスモードの非線形効果 (*Science* **345**, 1145, 2014) など明らかとなってきた。しかしながら、ポンプ・プローブ分光法は原理的にポンプ光・プローブ光間の遅延時間を変えながら繰り返し測定を行う必要があるため、光誘起相変化ダイナミクスなどの不可逆光誘起現象の解明、限界駆動下における伝導電子の光学応答、高強度 THz 波によるメタマテリアルの絶縁破壊 (*Nature* **487**, 345, 2012) などの非線形光学現象の可視化には不適であった。光・THz 波照射に伴うナノ空間の電場強度は極めて強くなるため、極限励起・限界駆動下で現れる非線形性の起源を明らかにし、非線形性に基づく物性制御の方法論を確立することは、次世代の集積ナノデバイスやプラズモニクデバイス創生などの応用研究にとっても極めて重要である。

研究代表者はこのような背景のもと、マイクロステップ構造を有する反射型エシェロンを作製し、これを空間的遅延時間発生光学素子として用いることで、高時間分解、スポット集光、広帯域 (可視・紫外) シングルショット検出のすべてを満たす世界唯一の時間・周波数 2 次元イメージング分光技術を構築した。また、この分光手法を駆使して、光記録メディアに使われているカルコゲナイド薄膜 ($\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$: 以下 GST) の相変化ダイナミクスの時間・周波数特性、更には、狭帯域 (0.1~2 THz) ではあるが THz 電場波形のシングルショット検出に成功した。一方、現在プローブ光の検出に用いている CCD 検出器の分光特性および THz 波発生手法の問題から、測定周波数帯域は、330~750 THz (可視~紫外)、0.1~2 THz に限られている。様々な物質の相変化ダイナミクスや非線形キャリア応答を系統的に理解するためには、電子遷移状態 (可視~紫外) だけではなく、バンドギャップ端近傍やプラズモン共鳴 (近赤外~可視域)、ドルーデ応答や赤外活性モード (遠赤外域) すべてをプローブできる超広帯域のシングルショット分光技術が必要であるとの認識に至った。

2. 研究の目的

上述の研究背景を受け、本研究では、以下を研究の主目的とした。

- (1) THz~近赤外~可視・紫外領域に渡る超広帯域シングルショット (ポンプ・プローブ) 分光法を開発する。
- (2) 光記録メディアに使われているカルコゲナイド薄膜 (GeTe 及び GST) の結晶相 \leftrightarrow アモルファス相への不可逆相変化ダイナミクスを THz・近赤外域でシングルショット計測する。また、相変化に関与する Ge-Te の A_1 モードをダブルパルスにより選択的に励振し、相変化効率の光制御を行う。
- (3) 特異なバンド分散を持つ Bi ナノ薄膜やナノギャップを有する金ナノ薄膜において、伝導・局在電子の振舞いを可視化する。高強度 THz 波により電子を限界駆動するとともに界面・電子散乱を抑制し、伝導電子の非線形加速や局在電子のトンネリング確率の制御を試みる。

3. 研究の方法

上述の研究目的に対し、以下の方法で研究を実行した。

- (1) 様々な非線形光誘起現象をシングルショット検出するため、検出波長の超広帯域化を行った。THz 領域においては、シングルショット光 (あるいは THz) ポンプ-THz プローブ分光法を構築した。既存の再生増幅レーザー (パルス幅 40 fs : 出力 2.2 mJ) からの出力を THz 発生系、ポンプ光系、プローブ光系に分けた。THz 発生系では気体プラズマあるいは LiNbO_3 プリズムにより THz 波 (0.1~10 THz) を発生させた。プローブ光系ではレーザーの基本波をエシェロンで回折させることで空間的な時間差をつけ、発生した THz 波とともに EO 結晶 (例えば ZnTe) に入射させ、電場波形のイメージを CMOS カメラで取得した。パルスジェネレータ、メカニカルシャッターと同期させ、1 パルスを抜き出した。
- (2) ガラス・サファイア、Si 基板上にプラズマスパッタにより高品位カルコゲナイド薄膜 (GeTe, GST; 膜厚 10~20 nm) を作製した。光パルス励起によりアモルファス記録マーカーが形成される閾値前後での GeTe・GST 薄膜の可視~近赤外~THz 相変化ダイナミクスを、(1) で構築した光学系を用いて詳細にシングルショット計測し、相変化量・相変化時間の励起密度依存性を測定した。
- (3) MBE 法により Si 基板上に高品位 Bi および BiSb 薄膜 (膜厚: 5~40 nm) を作製した。THz ポンプ-(THz~光) プローブ分光により透過率変化の励起密度依存性を計測し、ドルーデ解

析よりプラズマ周波数の変化を評価する。Bi および BiSb のディラック電子系のもつ特異なバンド分散を考慮し、伝導電子の非線形光学応答を評価するとともに、時間発展に伴う伝導電子のダイナミクス、運動量変化によるキャリア増殖の有無を調べた。

4 . 研究成果

以下に、得られた成果を列挙する。

- (1) 光ファイバーとチャープパルスを組み合わせて、高繰り返しでシングルショット検出ができるポンプ・プローブ手法を開発した。
- (2) パルス磁場とエシエロンベースの THz 時間領域分光法を組み合わせて、高磁場下の半導体のサイクロトロン共鳴を可視化した。
- (3) エシエロンベースの光及び THz カー効果スペクトル分析器を開発した。
- (4) 位相制御した THz パルスと走査トンネル顕微鏡 (STM) を組み合わせた THz-STM を開発し、超高速でトンネル電子の運動を制御することに成功した。
- (5) 単一アト秒パルスを用いて、絶縁体中に世界最高速 (667~383 アト秒) の電子分極を誘起した。
- (6) 超短パルスレーザーのパルス形状を波形整形し、複数の高周波フォノンモードの振幅を光制御することに成功した。
- (7) 極限励起下で次元パイエルス絶縁体の非線形光応答をシングルショット計測した。
- (8) Bi および BiSb のディラック電子を高強度 THz 波で励振し、Zener トンネリングによるキャリア増殖を実現した。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 30 件)

- 1) G. Mead, I. Katayama, J. Takeda, and G. A. Blake, "An Echelon-Based Single Shot Optical and Terahertz Kerr Effect Spectrometer", *Rev. Sci. Instrum.* **90**, 053107 (2019). 査読有 (doi.org/10.1063/1.5088377)
- 2) I. Katayama, H. Kawakami, T. Hagiwara, Y. Arashida, Y. Minami, L.-W. Nien, O. S. Handegard, T. Nagao, M. Kitajima, and J. Takeda, "Terahertz-Field-Induced Carrier Generation in Bi_{1-x}Sb_x Dirac Electron Systems", *Phys. Rev. B* **98**, 214302: pp. 1-5 (2018). 査読有 (DOI: 10.1103/PhysRevB.98.214302)
- 3) Y. Arashida, K. Murakami, I. Katayama, and J. Takeda, "Ultrafast Optical Control of Multiple Coherent Phonons in Silicon Carbide Using a Pulse Shaping Technique", *Appl. Phys. Exp.* **11**, 122701: pp. 1-4 (2018). 査読有 (doi.org/10.7567/APEX.11.122701)
- 4) J. Wolfson, T. Shin, S. W. Teitelbaum, I. Katayama, T. Kawano, J. Takeda, and K. A. Nelson, "Long-Lived Photoinduced Response Observed under Extreme Photoexcitation Densities in a One-Dimensional Peierls Insulator", *Phys. Rev. B* **98**, 054111: pp. 1-6 (2018). 査読有 (DOI: 10.1103/PhysRevB.98.054111)
- 5) K. Yoshioka, I. Katayama, Y. Arashida, A. Ban, Y. Kawada, K. Konishi, H. Takahashi, and J. Takeda, "Tailoring Single-Cycle Near-Field in a Tunnel Junction with Carrier-Envelope Phase-Controlled Terahertz Electric Fields", *Nano Lett.* **18**, pp. 5198-5204 (2018). 査読有 (DOI:10.1021/acs.nanolett.8b02161)
- 6) T. Kuribayashi, T. Motoyama, Y. Arashida, I. Katayama, and J. Takeda, "Anharmonic Phonon-Polariton Dynamics in Ferroelectric LiNbO₃ Studied with Single-Shot Pump-Probe Imaging Spectroscopy", *J. Appl. Phys.* **123**, 174103: pp. 1-8 (2018). 査読有 (doi.org/10.1063/1.5021379)
- 7) H. Mashiko, Y. Chisuga, K. Oguri, H. Masuda, I. Katayama, J. Takeda and H. Gotoh, "Multi-Petahertz Electron Interference in Cr:Al₂O₃ Solid-State Material", *Nat. Commun.* **9**, 1468: pp. 1-6 (2018). 査読有 (DOI: 10.1038/s41467-018-03885-7)
- 8) K. Maekawa, K. Yanagi, Y. Minami, M. Kitajima, I. Katayama, and J. Takeda, "Bias-Induced Modulation of Ultrafast Carrier Dynamics in Metallic Single-Walled Carbon Nanotubes", *Phys. Rev. B* **97**, 075435: pp. 1-6 (2018). 査読有 (doi.org/10.1103/PhysRevB.97.075435)
- 9) J. Takeda, K. Yoshioka, Y. Minami, and I. Katayama, "Nanoscale Electron Manipulation in Metals with Intense THz Electric Fields", *J. Phys. D: Appl. Phys.* **51**, 103001: pp. 1-9 (2018). 査読有 (doi.org/10.1088/1361-6463/aaa8c7)
- 10) 武田 淳、片山郁文、吉岡克将 (トピックス) 『高強度テラヘルツ波によるナノ空間電子制御』、*固体物理* **52**, pp. 439-446 (2017). 査読有 (https://www.agne.co.jp/kotaibutsuri/kota1052.htm)
- 11) 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. 30326-30337 (2016). 査読有 (doi.org/10.1364/OE.24.030328)
- 12) 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)

- 13) 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", *Nat. Photon.* **10**, pp. 762-765 (2016). 査読有 (DOI: 10.1038/nphoton.2016.205)

その他 17 編

〔学会発表〕(計 84 件)

- 1) 嵐田雄介、本山竜央、石原正輝、佐和孝嘉、羽田真毅、仁科勇太、片山郁文、武田 淳、『シングルショット過渡吸収分光における酸化グラフェンの光還元励起密度依存性』、17aK207-7、日本物理学会第 74 回年次大会 (2019 年 3 月 17 日、九州大学、福岡)。
- 2) 泉 健一、嵐田雄介、武田 淳、片山郁文、『チャープパルスを用いたテラヘルツ波の非共軸シングルショット検出』、11p-S421-2、2019 年第 66 回応用物理学会春季学術講演会 (2019 年 3 月 11 日、東工大、東京)。
- 3) 谷口将太郎、片山郁文、嵐田雄介、吉岡克将、吉田昭二、重川秀実、桑原正史、武田 淳、『カルコゲナイド合金 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ におけるナノスケール光誘起相変化』、9a-M112-9、2019 年第 66 回応用物理学会春季学術講演会 (2019 年 3 月 9 日、東工大、東京)。
- 4) 吉岡克将、片山郁文、嵐田雄介、伴 篤彦、河田陽一、小西邦昭、高橋宏典、武田 淳、(講演奨励賞受賞記念講演)『位相制御 THz-STM によるトンネル電子のナノ空間超高速サブサイクル制御』、9a-M135-1、2019 年第 66 回応用物理学会春季学術講演会 (2019 年 3 月 9 日、東工大、東京)。
- 5) 増子拓紀、小栗克弥、千菅雄太、片山郁文、武田 淳、後藤秀樹、(招待講演)『固体電子系におけるペタヘルツ超高周波現象の時間応答特性』、レーザー学会学術講演会第 39 回年次大会、14pXI-2 (2019 年 1 月 14 日、東海大学高輪キャンパス、東京)。
- 6) 小林真隆、嵐田雄介、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 Si のマルチタイムスケール測定』、21p-211A-13、レーザー学会学術講演会第 39 回年次大会 (2019 年 1 月 12 日、12pX-F6 東海大学高輪キャンパス、東京)。
- 7) 武田 淳 (招待講演)『THz 近接場によるサブサイクル電子マニピュレーション』、第 22 回名古屋大学 VBL シンポジウム (2018 年 11 月 21-22 日、名古屋大学)。
- 8) 嵐田雄介、石原正輝、鈴木貴之、本山竜央、佐和孝嘉、溝手翔太、羽田真毅、仁科勇太、片山郁文、武田 淳、『シングルショット過渡吸収分光法による酸化グラフェンの光還元ダイナミクス』、21p-211A-13、2018 年第 79 回応用物理学会秋季学術講演会 (9 月 21 日、名古屋国際会議場、愛知)。
- 9) 吉岡克将、片山郁文、嵐田雄介、伴 篤彦、河田陽一、小西邦昭、高橋宏典、武田 淳、(講演奨励賞)『位相制御 THz-STM を用いた THz 近接場とトンネル電子のサブサイクル制御』、21p-211A-11、2018 年第 79 回応用物理学会秋季学術講演会 (9 月 21 日、名古屋国際会議場、愛知)。
- 10) J. Takeda, K. Yoshioka, Y. Minami, Y. Arashida, and I. Katayama (**Keynote Talk**), "THz-Field-Driven Electron Tunneling On The Nanoscale," *43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2018)*, (9-14 September 2018, Nagoya, Japan).
- 11) I. Katayama, Y. Minami, Y. Arashida, O. S. Handegard, T. Nagao, M. Kitajima, and J. Takeda (**Invited Talk**), "Nonlinear Terahertz Dynamics of Dirac Electrons in Bi Thin Films", *SPIE Optics + Photonics 2018* (19-23 August 2018, San Diego, USA).
- 12) 武田 淳、(招待講演)『極短時間・ナノ空間で電子を操る！ ～テラヘルツ近接場によるナノスケール電子マニピュレーション～』、物理科学の最前線 (東北大学、2018 年 6 月 29 日)。
- 13) J. Takeda, K. Yoshioka, Y. Arashida, and I. Katayama (**Invited Talk**), "Nanoscale Electron Manipulation Using Phase-controlled THz Near-fields", *The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2018)*, (13-18 May 2018, San Jose, USA, **Oral**).
- 14) 吉岡克将、伴 篤彦、片山郁文、嵐田雄介、河田陽一、高橋宏典、武田 淳、『単一トンネル接合における THz 近接場を用いたサブサイクル電子制御』、23pK501-14、日本物理学会第 73 回年次大会 (2018 年 3 月 22 日、東京理科大学、千葉)。
- 15) 増子拓紀、小栗克弥、千菅雄太、片山郁文、須田 亮、武田 淳、後藤秀樹、(シンポジウム講演)『固体電子系のペタヘルツ超高周波動作』、22pK405-4、日本物理学会第 73 回年次大会 (2018 年 3 月 22 日、東京理科大学、千葉)。
- 16) 鈴木貴之、片山郁文、嵐田雄介、南 康夫、須藤祐司、進藤怜史、斎木敏治、武田 淳、『フェムト秒レーザーパルスによる相変化材料 GeCu_2Te_3 の光誘起相転移』、19p-B301-14、第 65 回応用物理学会春季学術講演会 (2018 年 3 月 19 日、早稲田大学、東京)。
- 17) 本山竜央、栗林知憲、嵐田雄介、片山郁文、武田 淳、『シングルショット分光による強誘電体フォノンポラリトンの非調和ダイナミクス解明』、19p-B301-13、第 65 回応用

物理学会春季学術講演会（2018年3月19日、早稲田大学、東京）。

- 18) K. Yoshioka, I. Katayama, A. Ban, Y. Arashida, Y. Kawada, H. Takahashi, and J. Takeda, "Sub-cycle control of THz near-field and electrons in a single tunnel junction", Gordon Research Conference and Seminar (GRC/S), *Ultrafast Phenomena in Cooperative Systems*, (Texas, USA, Feb. 2017, **Oral**).
- 19) 吉岡克将、片山郁文、嵐田雄介、伴 篤彦、河田陽一、高橋宏典、武田 淳、(光物性研究会奨励賞)『単一トンネル接合におけるモノサイクル THz 近接場の制御』、第 28 回光物性研究会（京都大学、2017年12月8日-9日）。
- 20) K. Yoshioka, I. Katayama, B. Atsuhiko, Y. Arashida, Y. Kawada, H. Takahashi, and J. Takeda, "Sub-cycle THz control of electrons in a tunnel junction with a carrier-envelope phase shifter", The 8th International Symposium on Terahertz Nanoscience (TeraNano 8), (20-23, November 2017, Okayama, **Oral**).
- 21) H. Mashiko, K. Oguri, Y. Chisuga, H. Masuda, T. Yamaguchi, A. Suda, I. Katayama, J. Takeda, and H. Gotoh (**Invited Talk**), "Petahertz Optical Drive with Wide-Bandgap Materials", IEEE Photonics Conference (IPC2017), (1-5 October 2017, Florida, **Oral**).
- 22) 伴 篤彦、吉岡克将、片山郁文、嵐田雄介、河田陽一、高橋宏典、武田 淳、『キャリアアエンベローブ位相制御テラヘルツパルスによるトンネルリング電子制御』、21aB21-12、日本物理学会 2017 秋季大会（9月21日、岩手大学、岩手）。
- 23) 千菅雄太、増子拓紀、小栗克弥、増田裕行、片山郁文、武田 淳、後藤秀樹、『ペタヘルツ周波数を伴うアルミナ (α -Al₂O₃) 電子系の多重振動応答』、6a-S45-3、応用物理学会秋季学術講演会（2017年9月6日、福岡国際会議場、福岡）。
- 24) 武田 淳、(招待講演)『位相制御 THz 波によるナノ空間電子マニピュレーション』、平成 29 年度第 3 回強光子場科学研究懇談会（横浜国立大学、2017年7月21日）。
- 25) K. Yoshioka, I. Katayama, Y. Arashida, Y. Minami, M. Kitajima, S. Yoshida, H. Shigekawa, and J. Takeda, "Coherent Manipulation of Electrons in a Tunnel Junction with Carrier-Envelope Phase Controlled THz Electric Fields", Nonlinear Optics (NLO 2017), (17-21 July 2017, Hawaii, **Oral**)
- 26) T. Kuribayashi, Y. Arashida, I. Katayama, and J. Takeda, "Ferroelectric Phonon-Polariton Dynamics in a Wide Temperature Range Revealed via Single-Shot Spectroscopy", *The Conference on Lasers and Electro-Optics* (CLEO 2017), FTh3F.1 (14-19 May 2017, San Jose, USA, **Oral**).
- 27) 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（2017年3月18日、大阪大学）。
- 28) 吉岡克将、片山郁文、嵐田雄介、南 康夫、北島正弘、吉田昭二、重川秀実、武田 淳、『位相制御モノサイクル THz-STM におけるトンネルリング電子の超高速実空間制御』、16a-311-6、第 64 回応用物理学会春季学術講演会（2017年3月14日、パシフィコ横浜、横浜）。
- 29) K. Yoshioka, I. Katayama, Y. Minami, M. Kitajima, S. Yoshida, H. Shigekawa, and J. Takeda, "Coherent Control of the Motion of Electrons in a Tunnel Junction via Single-Cycle THz Electric Field", *41st International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves* (IRMMW-THz 2016), W2E.2 (25-30 September 2016, Copenhagen, Denmark, **Oral**).
- 30) I. Katayama, M. Kobayashi, Y. Minami, J. Takeda, C. L. Johnson, P. D. Salmans, N. R. Ellesworth, 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, **Oral**).

その他 54 編

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 4 件)

名称：トンネル電流制御装置およびトンネル電流制御方法

発明者：武田淳、片山郁文、嵐田雄介、吉岡克将、河田陽一、高橋宏典

権利者：浜松ホトニクス

種類：特許

番号：特願 2017-160104

出願年：平成 29 年 8 月 23 日

国内外の別：国内

名称：トンネル電流制御装置およびトンネル電流制御方法

発明者：武田淳、片山郁文、嵐田雄介、吉岡克将、河田陽一、高橋宏典

権利者：浜松ホトニクス
種類：特許
番号：特願 2017-160107
出願年：平成 29 年 8 月 23 日
国内外の別： 国内

名称：TUNNEL CURRENT CONTROL APPARATUS AND TUNNEL CURRENT CONTROL METHOD

発明者：Y. Kawada, H. Takahashi, J. Takeda, I. Katayama, Y. Arashida, K. Yoshioka

権利者：浜松ホトニクス

種類：特許

番号：US20190064209A1

出願年：Feb. 28, 2019

国内外の別： 国外

名称：TUNNEL CURRENT CONTROL APPARATUS AND TUNNEL CURRENT CONTROL METHOD

発明者：Y. Kawada, H. Takahashi, J. Takeda, I. Katayama, Y. Arashida, K. Yoshioka

権利者：浜松ホトニクス

種類：特許

番号：US20190064210A1

出願年：Feb. 28, 2019

国内外の別： 国外

取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

1) <http://www.ultrafast.ynu.ac.jp/>

2) <http://www.laser-nanoscience.ynu.ac.jp/ja/>

3) <http://oqt.ynu.ac.jp/>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：片山 郁文

ローマ字氏名：(KATAYAMA, ikufumi)

所属研究機関名：横浜国立大学

部局名：大学院工学研究院

職名：准教授

研究者番号（8 桁）：80432532

(2) 研究分担者

研究協力者氏名：南 康夫

ローマ字氏名：(MINAMI, yasuo)

所属研究機関名：徳島大学

部局名：大学院社会産業理工学研究部（理工学域）

職名：特任准教授

研究者番号（8 桁）：60578368

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。