

令和元年6月24日現在

機関番号：92704

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H05987

研究課題名(和文)単一アト秒パルスを用いた超高速光応答デバイスの実現

研究課題名(英文)Realization of ultrafast optical device with isolated attosecond pulse

研究代表者

増子 拓紀(Mashiko, Hiroki)

日本電信電話株式会社NTT物性科学基礎研究所・量子光物性研究部・主任研究員

研究者番号：60649664

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、真空紫外領域にて発生する100京分の1秒のパルス幅を持つ単一アト秒パルス光を用いて、固体電子系で生じるペタヘルツ(1000兆ヘルツ)の電子物性を観測することを目的としている。窒化ガリウム半導体およびクロム添加サファイア絶縁体内部で生じるペタヘルツ電子振動の観測に成功した。この超高周波の電子振動は、同周波数帯に位置する可視・紫外領域の光電界により誘起される電子分極応答に起因している。本研究は、半導体により構築される発光素子(ディスプレイ・発光ダイオード)や光検出器(カメラ・受光センサー)等の初期電子応答を調査することに役立つと予測され、将来の半導体素子の効率改善に役立つ可能性がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

アト秒パルスとは、100京分の1秒という極めて高い時間分解能を有した光源であり、超高速で運動する電子の直接的な時間観測を可能とする。本研究では、窒化ガリウム半導体やクロム添加サファイア絶縁体内部において運動するペタヘルツ(1000兆ヘルツ)級の電子振動(860-383アト秒周期)観測に成功している。この電子振動は、同周波数帯に位置する可視・紫外領域の光電界により生じる誘電分極に起因しており、吸収・反射・屈折・発光・電流等の様々な光物性現象を生み出している。本研究は、光物質相互作用の根幹を理解することに役立つと同時に、電子・光デバイスの効率改善や新たな光機能性の発現に役立つ可能性がある。

研究成果の概要(英文)：The lightwave-field induces ultrafast electric dipole oscillation in the solid-state material, and the lightwave-field-induced electron oscillation is the important physical phenomenon in the fundamental light-matter interaction. We successfully observed the near-infrared (NIR)-pulse-induced electronic dipole oscillations with 860-383 attosecond periodicities in the gallium nitride (GaN) semiconductor and the chromium doped sapphire (Cr:Al₂O₃) insulator. The measurement was achieved by using the extreme short IAP (192-as duration) and a stable pump (NIR pulse) and probe (IAP) system (timing jitter of ~23 as). Since electron oscillation is the origin of the light-matter interaction, results are important for monitoring various optical phenomena through the dielectric polarization. The time dependence will be useful for the study of electronic and photonic devices.

研究分野：アト秒科学、高強度物理、超高速物理、超高速光学

キーワード：アト秒科学 アト秒パルス 超高速物理 高強度物理 超高速光学 量子エレクトロニクス 原子・分子光学物理 量子光学

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

近年、実現された100京分の1秒(10^{-18} 秒: as)のパルス幅を持つアト秒パルス光源は、超高速の運動過程を持つ電子の実時間計測および制御を可能とする。従来、この波長領域では、軌道放射光が光源の主流であり、基礎物理、分析化学、固体物性、産業技術応用に至まで多岐の分野に渡り科学貢献してきた。アト秒パルスは軌道放射光よりもパルス幅が100万倍短い利点を持ち、その時間スケールは電子運動の時間観測を可能とし、次世代の光源として注目されている[1,2]。

一方で、アト秒レベルの高い時間分解能が実現したことにより、固体物質中で生じるペタヘルツ(10^{15} Hz : PHz)級の電子振動(双極子振動)の時間観測が可能となった[3-5]。この電子振動は、同周波数帯域に位置する可視・紫外領域の光電界が誘起する分極応答(誘電分極)に起因しており、吸収・反射・屈折・発光・電流等の様々な光物性現象を生み出している。図1は、電子振動の周波数と時間周期に対する誘電率の定性的な応答特性を示す。この電子振動は、発光ダイオードや太陽電池、光合成等を通して我々の生活にも欠かせない物理応答である。この様な可視・紫外領域に相当するペタヘルツ電子振動を捉えることは、光物質相互作用の根幹を理解することに役立つと同時に、光電界による電子運動の直接的な時間操作が可能となるため、新たな基礎研究領域を創生する可能性がある。

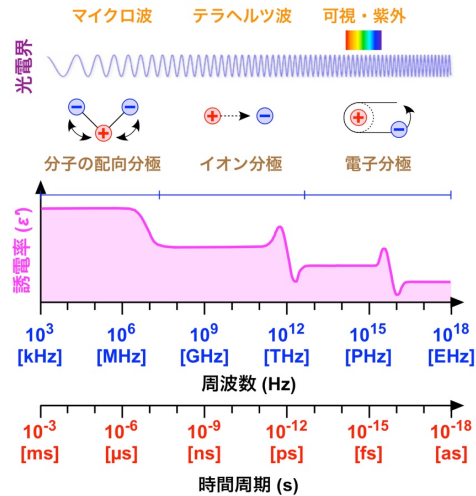


図1 誘電率の周波数および時間特性。

参照文献

- [1] F. Krausz et al., Rev. Mod. Phys. 81, 163 (2009).
- [2] F. Krausz et al., Nature Photon. 8, 205 (2014).
- [3] M. Schultze et al., Nature 493, 75 (2013).
- [4] M. Schultze et al., Science 346, 1348 (2014).
- [5] M. Lucchini et al., Science 353, 916 (2016).

2. 研究の目的

本研究の目的は、極短アト秒パルス光源を用いて半導体・絶縁体中で生じる超高速の電子振動現象を直接的に時間観測し、光物性の電子応答起源の解明を行う。また同時に、電子・光デバイスの新たな光機能性を発現する可能性を模索し、基礎物理・化学分野への貢献のみならず、産業界においても重要な役割を創出することを目標とする。

3. 研究の方法

過去の研究において申請者が開発した二重光学ゲート法(DOG: Double Optical Gating) [1]は、数十フェムト秒のパルス幅を持つ近赤外領域の基本波パルスから、単一化されたアト秒パルスの発生を可能とし、高輝度化(ナノジュール化)[2]・超広帯域化(>100 eV) [3,4]・短パルス化[5]にも適した光学技術である。

本研究では、真空紫外から極端紫外領域の単一アト秒パルス(パルス幅: 660-192 as@17-50 eV[6])を検査光源とし、近赤外領域フェムト秒パルス(7 fs@1.6 eV)の励起光により誘起された固体物質中の電子振動(双極子振動)を観測する。図2に窒化ガリウム(GaN)半導体およびクロム添加サファイア(Cr:Al₂O₃)絶縁体を用いた過渡吸収分光実験の概要を示す。過渡吸収分光法とは、物質が光を吸収する強さを時間分解計測する手法であり、ポンプ光(励起光)により誘起された物質中の現象を、任意の時間を遅らせたプローブ光(検査光)により吸光度(吸収率)の変化から観測する手法である。図2(b)に示す様に、本実験で構築した光学系は、12時間に渡る計測で23

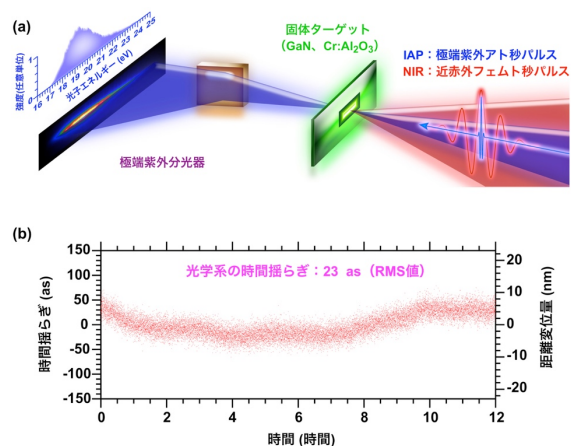


図2 実験概要図。(a) GaN半導体およびCr:Al₂O₃絶縁体を用いた過渡吸収分光光学系。IAP: 単一アト秒パルス(192 as@44 eV, 660 as@20 eV)、NIR: 近赤外フェムト秒パルス(7 fs@1.6 eV)。(b) ポンププローブ光学系の長期安定性(時間揺らぎ: 23 as@12時間)。

as と非常に高安定化されており、相当する距離変位は 10 ナノメートル (10 億分の 1 メートル: nm) 程度まで抑制されている。また、ターゲットに用いた GaN 半導体および Cr:Al₂O₃ 絶縁体基板の厚さは、アト秒パルスの透過率を 20%程度に保つため 100 nm 以下までアルゴンイオンミリング加工により薄膜化し、独立膜 (成長基板無し) を使用している。図 3 に (a) GaN 半導体、(b) Cr:Al₂O₃ のバンド構造図を示す。本実験では、ウルツ鉱型 GaN 真性半導体および菱面体晶系の Al₂O₃ (Cr 添加濃度比: 1×10^{-3} at. %) を用いた。両物質共に波数 (K) 近傍での電子の直接遷移を可能とし、ここでは近赤外フェムト秒パルス (1.6 eV) の多光子過程により、電子のバンド間遷移分極が誘起される。同様に、真空紫外・極端紫外領域のアト秒パルス (17-50 eV) は、価電子帯 (VB) と伝導帯 (CB) に存在する電子の同時励起を可能とする。Cr:Al₂O₃ においては、Cr 添加物により形成される中間準位 (IM) にも遷移する。アト秒パルスにより励起される電子は、最終的に伝導帯の高準位へと遷移する。この時、高準位の伝導帯は、密な準位構造を形成するため、ここでは擬似連続準位として振る舞うと予測される。

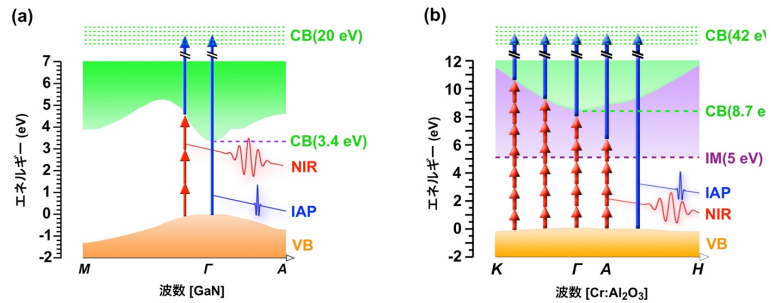


図 3 バンド構造図。(a) GaN 半導体、(b) Cr:Al₂O₃ 絶縁体。VB : 価電子帯、CB : 伝導帯、IM : 中間準位。

参考文献

- [1] H. Mashiko et al., Phys. Rev. Lett. 100, 103906 (2008).
- [2] H. Mashiko et al., Phys. Rev. A 77, 063423 (2008).
- [3] H. Mashiko et al., App. Phys. Lett. 102, 171111 (2013).
- [4] K. Oguri et al., App. Phys. Lett. 112, 181105 (2018).
- [5] H. Mashiko et al., Opt. Lett. 34, 3337 (2009).
- [6] H. Mashiko et al., Nature commun. 5, 5599 (2014)

4. 研究成果

図 4 (a) に GaN 半導体において計測された過渡吸収分光波形を示す。ここで示される ΔOD は、近赤外フェムト秒パルス (集光強度: 1×10^{10} W/cm²) の照射の有・無しに対する相対的なアト秒パルスの吸光度を表している。吸収波形が示す様に、アト秒パルスの光子エネルギー領域 (17.5-23.5 eV) 全体において、サブフェムト秒周期を伴う電子の振動現象が観測された。GaN 半導体のバンドギャップ (3.4 eV) よりも広い白色のスペクトル帯域 (17.5-23.5 eV) を持つ単一アト秒パルスは、価電子帯と伝導帯から異なる 2 つの電子遷移を作り出し、電子波束の重ね合わせ状態を生じさせる。結果として、この重ね合わせ状態が引き起こす量子干渉効果[1,2]が、アト秒パルスの吸収スペクトル上に現れるため、電子の双極子振動の実験的な観測が可能となる。次に、光子エネルギー領域 (17.5-23.5eV) を積算したラインプロファイルを図 4 (a) の下図に示す。観測された電子振動の振動周期は 860 as に達し、周波数は 1.2 PHz に相当する[3]。図 4 (b) は、(a) の遅延時間軸をフーリエ変換した波形である。結果が示すように、4.8 eV に支配的な振動成分が存在する。図中で緑影に示される部位は、伝導帯の領域に相当する。矢印および破線は、近赤外フェムト秒パルス ($\hbar\omega=1.6$ eV) の各光子エネルギー成分 ($1-4\hbar\omega$) に対応する。この振動現象が、3 光子エネルギーの成分に起因していることが分かる。重ね合わせ状態に伴う量子干渉効果は 3 準位構成 (VB、CB、高準位 CB) を要求するため、バンドギャップ以上の光子エネルギー成分しか観測することができない。それ故、

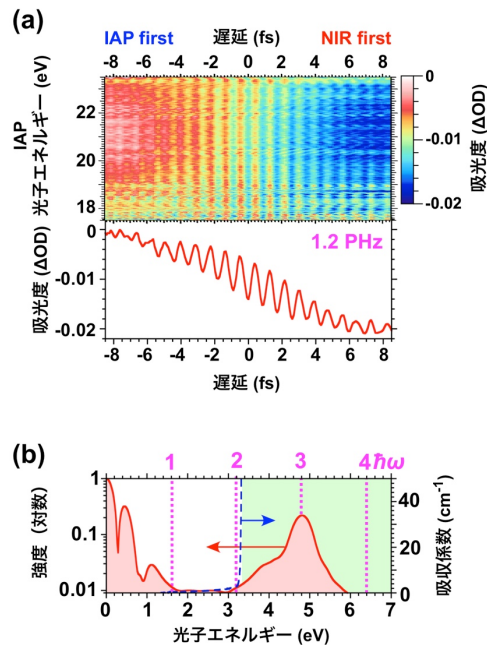


図 4 GaN 半導体における電子振動波形。(a) 過渡吸収分光波形 (上図)、ラインプロファイル (下図)。(b) フーリエ変換後のエネルギー分布図。赤実線: 強度分布、青破線: 吸収係数、ピンク点線: 励起光の光子エネルギー成分、緑影部: 伝導帯。

バンドギャップ以上で最も低次数の 3 光子過程が振動現象を支配していることが分かる。このような半導体電子系が作る超高周波の電子応答特性は、将来の信号処理技術の高速化に応用できる可能性があり、また半導体の新たな光機能性を実現する上で重要な知見になると考えられる。

次に、Cr:Al₂O₃ 絶縁体において計測された電子振動波形を図 5 (a) に示す。ここでの近赤外フェムト秒パルスの集光強度は、 2×10^{12} W/cm² である。この波形は 667-383 as の振動周期成分から構成されており、相当する周波数は 1.5-2.6 PHz に達する[4]。これは、固体物質において時間分解計測により観測された世界最速の振動現象である。半導体よりも大きいバンドギャップを要する絶縁体では、誘起される電子振動もより高速化する。図 5 (b) は、(a) の遅延時間軸をフーリエ変換した波形である。励起光の多光子励起(4-7 次: $4-7\hbar\omega$)により生じた電子遷移が、中間準位および伝導帯中で形成されていることが分かる。摂動的な電子励起と吸収係数の構造が、この様な多重の電子振動波形を形成している。この中間準位に対応する吸収係数は、添加率に依存するため、材料操作により電子振動の波形制御も将来的に可能になると考えられる。この様な添加物質を伴う物質の電子振動を調査することは、光学結晶や p-n 接合を基本とする電子・光デバイスにおいては極めて重要な意味を持つ。将来的には、発光素子(ディスプレイ・発光ダイオード)や光検出器(カメラ・受光センサー)等の効率改善に向けた研究に役立つ可能性がある。

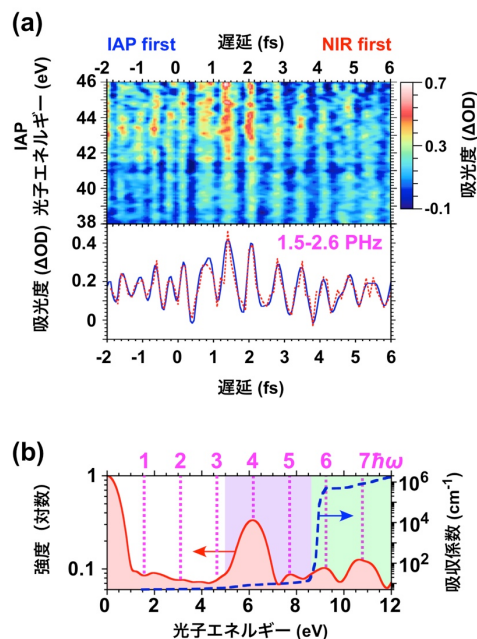


図 5 Cr:Al₂O₃ 絶縁体における電子振動波形。(a) 過渡吸収分光波形(上図)、ラインプロファイル(下図)。(b) フーリエ変換後のエネルギー分布図。赤実線:強度分布、青破線:吸収係数、ピンク点線:励起光の光子エネルギー成分、紫影部:中間準位、緑影部:伝導帯。

参考文献

- [1] E. Goulielmakis et al., Nature 466, 739 (2010).
- [2] R. Santra et al., Phys. Rev. A 83, 033405 (2011).
- [3] H. Mashiko et al., Nat. Phys. 12, 741-745 (2016).
- [4] H. Mashiko et al., Nat. Commun. 9, 1468 (2018).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

- [1] Yuta Chisuga, **Hiroki Mashiko**, Katsuya Oguri, Ikufumi Katayama, Jun Takeda, and Hideki Gotoh, "Electric dipole oscillation in solids characterized by Fourier transform extreme ultraviolet attosecond spectroscopy," Ultrafast Phenomena 21: Proceedings of the 21st International Conference, EPJ Web of Conferences 205, 02015 (2019).
- [2] **増子 拓紀**, 千菅 雄太, 片山 郁文, 小栗 克弥, 増田 裕行, 武田 淳, 後藤 秀樹, "固体電子系のアト秒振動~Cr:Al₂O₃ 固体電子系のペタヘルツ多重電子干渉~, 光学「2018 年 日本の光学研究」(印刷中) .
- [3] **Hiroki Mashiko**, Yuta Chisuga, Ikufumi Katayama, Katsuya Oguri, Hiroyuki Masuda, Jun Takeda, and Hideki Gotoh, "Multi-petahertz electron interference in Cr:Al₂O₃ solid-state material," Nat. Commun. 9, 1468 (2018).
- [4] Katsuya Oguri, **Hiroki Mashiko**, Tatsuya Ogawa, Yasutaka Hanada, Hidetoshi Nakano, and Hideki Gotoh, "Sub-50-as isolated extreme ultraviolet continua generated by 1.6-cycle near-infrared pulse combined with double optical gating scheme," App. Phys. Lett. 112, 181105 (2018).
- [5] **増子 拓紀**, 小栗 克弥, 後藤 秀樹, "半導体電子系におけるペタヘルツ光学動作", レーザー研究会誌(アト秒科学特集号) 45, 217-220 (2017).
- [6] **Hiroki Mashiko**, Katsuya Oguri, Tomohiko Yamaguchi, Akira Suda, and Hideki Gotoh, "Petahertz optical drive with wide-bandgap semiconductor," Nat. Phys. 12, 741-745 (2016).
- [7] Katsuya Oguri, **Hiroki Mashiko**, Tetsuya Ogawa, Yasutaka Hanada, and Hideki Gotoh, "Generation of isolated attosecond pulse with over 70 eV bandwidth by double optical gated sub-two-cycle pulse," Proceedings International Conference on Ultrafast Phenomena (2016), UW2B.4, OSA Publishing's Digital Library.

[学会発表] (計 29 件)

- [1] Koji Asaga, **Hiroki Mashiko**, Yuta Chisuga, Ikufumi Katayama, Jun Takeda, Tadashi Nishikawa, Katsuya Oguri, and Hideki Gotoh, “Actively stabilized extreme ultraviolet attosecond interferometer,” The 8th advanced lasers and photon sources (ALPS 8), ALPS-17-02, April 22-25 (2019).
- [2] **増子 拓紀**, 千菅 雄太, 浅賀 浩司, 片山 郁文, 武田 淳, 西川 正, 小栗 克弥, 後藤 秀樹, “アト秒位相干渉分光に向けた極端紫外干渉光学系の構築”, 2019 年 第 66 回応用物理学会春季学術講演会, 10a-M135-1, 東京, 2019 年 3 月 9-12 日.
- [3] (招待講演) **増子 拓紀**, 小栗 克弥, 千菅 雄太, 片山 郁文, 武田 淳, 後藤 秀樹, “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, A4-14pXI-2, 東京, 2019 年 1 月 12-14 日.
- [4] (招待講演) 小栗 克弥, **増子 拓紀**, 當銘 賢人, 加藤 景子, 関根 佳明, 日比野 浩樹, 須田 亮, 後藤 秀樹, “ペタヘルツ波エンジニアリングに向けた固体超高速光物性”, レーザー学会学術講演会第 39 回年次大会, S6-13aIII-2, 東京, 2019 年 1 月 12-14 日.
- [5] Yuta Chisuga, **Hiroki Mashiko**, Katsuya Oguri, Ikufumi Katayama, Jun Takeda, and Hideki Gotoh, “Electric dipole oscillation in solids characterized by Fourier transform extreme ultraviolet attosecond spectroscopy,” The 21st International conference on ultrafast phenomena (UP 2018), TUE.1.6, Hamburg, July 15-20 (2018).
- [6] Katsuya Oguri, Kento Tome, **Hiroki Mashiko**, Yoshiaki Sekine, Keiko Kato, Hiroki Hibino, Akira Suda, and Hideki Gotoh, “Nonequilibrium Dirac electron dynamics in SiC graphene probed by sub-10-fs angle-resolved photoemission spectroscopy,” The 21st International Conference on Ultrafast Phenomena (UP 2018), THU.PO12, Hamburg, July 15-20 (2018).
- [7] Katsuya Oguri, Kento Toume, Yuya Hasegawa, **Hiroki Mashiko**, Keiko Kato, Yoshiaki Sekine, Hiroki Hibino, Akira Suda, Tadashi Nishikawa, and Hideki Gotoh, “Dirac electron dynamics of graphene related systems towards petahertz-scale solid state technology,” The 9th Shanghai-Tokyo Advanced Research Symposium on Ultrafast Intense Laser Science (STAR 9), May 25-26 (2018).
- [8] Kento Toume, Katsuya Oguri, **Hiroki Mashiko**, Keiko Kato, Yoshiaki Sekine, Hiroki Hibino, Akira Suda and Hideki Gotoh, “Development of time-resolved ARPES based on 8-fs high-harmonic source in the extreme ultraviolet region,” The Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics and Laser Science Conference 2018 (CLEO/QELS 2018), JTu2A, May 13-18 (2018).
- [9] Kento Toume, Katsuya Oguri, **Hiroki Mashiko**, Keko Kato, Yoshiaki Sekine, Hiroki Hibino, Akira Suda, and Hideki Gotoh, “Measurement of carrier dynamics of the graphite by time-resolved ARPES,” The 7th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS 2018), ALPSp-12, Yokohama, April 24-27 (2018).
- [10] (招待講演) **増子 拓紀**, 小栗 克弥, 千菅 雄太, 増田 裕行, 片山 郁文, 武田 淳, 後藤 秀樹, “アト秒パルス光源を用いた半導体電子系のペタヘルツ光動作”, 第 31 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 企画講演 2, 茨城, 日本, 2018 年 1 月 8-10 日.
- [11] Kento Toume, Katsuya Oguri, **Hiroki Mashiko**, Kato Kato, Akira Suda, and Hideki Gotoh, “Development of time-resolved ARPES and absorption spectroscopy system based on quasi-monocycle-pulse driven high-harmonic source,” The International Symposium on Ultrafast Intense Laser Science 16 (ISUILS16), Lijiang, October 29-November 3 (2017).
- [12] (招待講演) **Hiroki Mashiko**, Katsuya Oguri, Yuta Chisuga, Ikufumi Katayama, Tomohiko Yamaguchi, Akira Suda, Hiroyuki Masuda, Jun Takeda, and Hideki Gotoh, “Petahertz optical drive with wide-bandgap materials,” 2017 IEEE Photonics Conference (IPC2017), 30th Annual Conference of the IEEE Photonics Society, W11.2, Florida, October 1-5 (2017).
- [13] 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”, 2017 年 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 16a-S45-3, 福岡, 2017 年 9 月 5-8 日.
- [14] (招待講演) Katsuya Oguri, **Hiroki Mashiko**, and Hideki Gotoh, “Broadband isolated attosecond pulse generation and its application to PHz-wave and electron interaction dynamics in solid,” 2nd International Symposium on Attosecond Science, Saitama, August 26 (2017).
- [15] **Hiroki Mashiko**, Katsuya Oguri, Yuta Chisuga, Hiroyuki Masuda, Ikuhumi Katayama, Jun Takeda, and Hideki Gotoh, “Petahertz electron dynamics with wide-bandgap semiconductor,” The 6th international conference on Attosecond Physics (ATTO 6), Xi'an, July 2-7 (2017).
- [16] Katsuya Oguri, **Hiroki Mashiko**, Tatsuya Ogawa, Yasutaka Hanada, and Hideki Gotoh, “Attosecond-pulse continua with over 70 eV bandwidth by using double optical gated sub-two-cycle pulse (invited talk),” The 8th Shanghai-Tokyo Advanced Research Symposium on Ultrafast Intense Laser Science (STAR8), Dunhuang, May 27-30 (2017).
- [17] (招待講演) **Hiroki Mashiko**, Katsuya Oguri, and Hideki Gotoh, “Petahertz semiconductor drive characterized by isolated attosecond pulse,” The 8th asian workshop on generation and application of coherent XUV and x-ray radiation (8th AWCXR), Hsinchu, Taiwan, March 27-29 (2017).
- [18] Hiroyuki Masuda, Yuta Chisuga, **Hiroki Mashiko**, Katsuya Oguri, and Hideki Gotoh, “Generation and temporal characterization of isolated attosecond pulse using double optical gating method,” The 12th Nano technology symposium in Yokohama National University, N51, Yokohama, March 7 (2017).
- [19] Yuta Chisuga, Hiroyuki Masuda, **Hiroki Mashiko**, Katsuya Oguri, and Hideki Gotoh, “Transient

- absorption spectroscopy of Al₂O₃ insulator electronics,” The 12th Nano technology symposium in Yokohama National University, N42, Yokohama, March 7 (2017).
- [20] (招待講演) Katsuya Oguri, **Hiroki Mashiko**, Tomohiko Yamaguchi, Akira Suda, and Hideki Gotoh, “Light-induced electron dynamics in semiconductor using attosecond light source ~petahertz electric manipulation,” The Japan society of applied physics/Quantum electronics symposium, Karuizawa, December 8 (2016).
- [21] (招待講演) Katsuya Oguri, **Hiroki Mashiko**, Tomohiko Yamaguchi, Akira Suda, and Hideki Gotoh, “Petahertz electronic response in semiconductor,” The 9th Asian Symposium on Intense Laser Science (ASILS 9), A-17, Ninh Binh City, November 6-10 (2016).
- [22] (招待講演) Katsuya Oguri, **Hiroki Mashiko**, Tomohiko Yamaguchi, Akira Suda, and Hideki Gotoh, “Petahertz engineering with attosecond light source,” The 4th RIKEN symposium, Wako, November 1 (2016).
- [23] (招待講演) Katsuya Oguri, **Hiroki Mashiko**, Tomohiko Yamaguchi, Akira Suda, and Hideki Gotoh, “Light-induced electron dynamics in semiconductor from femtosecond to attosecond regime,” The international symposium on ultrafast intense laser science 15 (ISUILS15), Cassis, October 2-6 (2016).
- [24] Katsuya Oguri, **Hiroki Mashiko**, Tomohiko Yamaguchi, Akira Suda, and Hideki Gotoh, “Generation of isolated attosecond pulse with over 70 eV bandwidth by double optical gated sub two-cycle pulse,” International conference on ultrafast phenomena 2016 (UP 2016), 21p-S622-7, Santa Fe, USA, July 17-22 (2016).
- [25] (招待講演) **Hiroki Mashiko**, Katsuya Oguri, Tomohiko Yamaguchi, Akira Suda, and Hideki Gotoh, “Attosecond pulse generation and its application,” International workshop on theory for attosecond quantum dynamics 15 (IWTAQD 15), Tokyo, Japan, June 20-21 (2016).
- [26] (招待講演) Katsuya Oguri, **Hiroki Mashiko**, Hidetoshi Nakano, Y. Okano, Tadashi Nishikawa, Keiko Kato, Atsushi Ishizawa, Kouta Tateno, Tomohiko Yamaguchi, T. Tsunoi, Akira Suda, Tetsuomi Sogawa, and Hideki Gotoh, “Ultrafast x-ray spectroscopy for pioneering attosecond electron dynamics—towards petahertz engineering,” International workshop on theory for attosecond quantum dynamics 15 (IWTAQD 15), Tokyo, Japan, June 20-21 (2016).
- [27] **Hiroki Mashiko**, Katsuya Oguri, Tomohiko Yamaguchi, Akira Suda, and Hideki Gotoh, “Petahertz frequency operation with gallium nitride semiconductor,” The Conference on lasers and electro-optics and applications and the quantum electronics laser science conference 2016 (CLEO/QELS 2016), FTu3N, San Jose, USA, June 5-10 (2016).
- [28] (招待講演) Katsuya Oguri, **Hiroki Mashiko**, Tomohiko Yamaguchi, Akira Suda, and Hideki Gotoh, “Observation of petahertz electronic oscillation in semiconductor based on attosecond spectroscopy,” The 7th Shanghai-Tokyo Advanced Research Symposium on Ultrafast Intense Laser Science (STAR 7), Hayama, May 20-22 (2016).
- [29] **増子 拓紀**、小栗 克弥、後藤 秀樹、“100 eV 帯域幅を持つ単一アト秒パルス発生”、2016 年 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会、2016 年 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会、14p-C32-2、名古屋、2016 年 9 月 13-16 日。

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

- [1] 報道発表 : <http://www.ntt.co.jp/news2018/1804e/180417a.html>
- [2] 報道発表 : <http://www.ntt.co.jp/news2016/1604e/160411b.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

研究代表者：増子 拓紀

ローマ字氏名：Hiroki Mashiko

所属研究機関名：日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所

部局名：量子光物性研究部、量子光デバイス研究グループ

職名：主任研究員

研究者番号 (8 桁)：60649664

※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。