

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14632

研究課題名（和文）金属相および相転移点近傍における高次高調波を用いた非平衡電子状態の研究

研究課題名（英文）High harmonic spectroscopy of non-equilibrium electron dynamics in phase change materials

研究代表者

内田 健人 (Uchida, Kento)

京都大学・理学研究科・特定助教

研究者番号：40825634

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、金属相や相転移を示す材料の相転移点近傍での、高強度光駆動によって誘起される電子ダイナミクスおよび非線形光学応答の理解を目指した。この目的のため温度依存性を測定可能な反射型高次高調波検出系を構築し、モット絶縁体や電荷秩序系における高次高調波の特性を調べた。結果としてモット絶縁体Ca₂RuO₄では、モットギャップに対して指数関数的に高次高調波発生効率が增大する特異な法則が存在することを発見した。このことは非線形光学特性に電子相関の効果が大きく寄与することを示している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

非線形光学応答は、量子光学や生体イメージングなどの基礎研究、光ゲートやレーザーポインターなどの応用など広く利用されておりその基礎物理的な理解は重要である。特に申請者は、レーザー光強度が極端に強い際に生じる非線形光学応答をこれまで良く調べられていなかった強相関電子系と呼ばれる物質群で調べた。結果としてこれまで研究されてきた物質とは異なる特異な振る舞いを非線形光学応答が示し、シンプルな法則に従うことを明らかにした。このことは、新しい非線形材料の設計指針などを与える可能性がある。

研究成果の概要（英文）：In this study, I clarified the non-equilibrium dynamics and nonlinear optical response of electrons in metals and phase change materials. For this purpose, I constructed reflection-type high-harmonics measurement system with cryostats to measure temperature dependence of high harmonics in phase change materials. Using this system, I investigated high harmonics properties in Mott insulating ruthenates and manganites. In Mott insulator Ca₂RuO₄, we discovered that the efficiency of high harmonics obeys the extraordinary empirical law. Our discovery indicates that the strong correlation between electrons plays an important role in nonlinear optical properties of materials.

研究分野：光物性

キーワード：高次高調波発生 非線形光学 超高速現象

1. 研究開始当初の背景

光によって固体の物性を制御することは光物性分野における中心課題の一つである。この課題の実現は、光誘起非平衡状態における多体電子系の振る舞いの理解とともに、超高速なスイッチング素子や量子情報処理等の応用へとつながるため重要である。これまでの光照射による物性変化は主に電子系を光励起した後の緩和プロセスと緩和の後に現れる準安定状態を対象としてきた。一方、近年の赤外域における高強度なレーザー光の実現により、試料を破壊することなく固体中の電子系を極端に非平衡な状態まで駆動することで、光照射下で固体物性の制御を行う新たな試みが盛んになっている。一般に光駆動は電子系にエネルギーを投入するため、無限時間後には系は熱化した無秩序な状態となってしまうが、熱化前の短い時間スケールに限れば、非自明な非平衡定常状態が存在しうることが理論的に示唆されている。光誘起非平衡定常状態では、平衡状態より高温での秩序相の実現や、新奇な電子状態の発現などの非自明な現象が観測される可能性があるが、固体で実際に実現するかは明らかでない。この実現には高強度光電場下で実現する非平衡電子状態の極短い時間スケール(典型的には 10-12s 以下)でのダイナミクスを理解することが重要となる。高強度光電場下の物質中で生ずる最も典型的な光学現象として物質の非線形性によって入力光子エネルギーの整数倍の放射が生じる高次高調波発生がある。高次高調波発生には電子の高速な非平衡ダイナミクスの情報が含まれ、その理解は物質の光による高速制御においても重要である。これまで高次高調波は固体では半導体などの一電子近似の成り立つ系で良く調べられてきた。一方、金属などのフェルミ面の存在する系や強相関電子系などの電子相関の強い系において非線形光学応答がどのような電子ダイナミクスを反映しているかは明らかでない。

2. 研究の目的

本研究では、高強度光を照射した際の最も基本的な光学過程である高次高調波発生の観測を通じて、固体中電子の高強度光電場下での超高速ダイナミクスを明らかにする。特に、これまで高次高調波発生の行われてきた半導体や絶縁体ではなく、金属や金属相から相転移を示す物質群を対象とすることで、フェルミ面やバンド構造と高強度光電場下の電子ダイナミクスの関連を明らかにする。駆動光の電場強度や偏光を精密に制御しながら高調波の温度依存性を測定することで、光電場下の非平衡電子状態を明らかにし、その知見をもとに固体中電子状態の光による高速制御を試みる。これまでの光誘起非平衡状態の研究は光で励起状態へと電子を励起し、その緩和過程や緩和の後に現れる準安定な状態に着目したものがほとんどである。本研究では光電場による駆動下で、光による偏光や位相を電子系が記憶している時間スケールの、金属や強相関電子系の非平衡電子状態を対象として、その解明を目指す。

3. 研究の方法

高次高調波特性の精密な温度依存性を測定するために、クライオスタットを組み込んだ高次高調波発生測定系の構築を行う。また、光学領域で不透明な材料やバルク材料でも高次高調波測定を可能とするために反射配置の高次高調波測定系を新たに構築する。電場強度や偏光を精密に制御しながら、高調波強度や偏光選択則の温度依存性を系統的に調べることで、高次高調波におけるフェルミ面や、電子相関・相転移による電子構造の変化の影響を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 薄膜金属 NbSe₂ における高次高調波特性の研究

遷移金属ダイカルコゲナイドの一群は、ファンデルワールス力で弱く結合した層状物質で機械的剥離などによって容易に原子層レベルの薄膜を作成できるのが特徴で、金属から絶縁体、磁性体から超伝導体と多様な物性を示す。この研究では、本研究課題の目的である金属における高強度光電場下の電子ダイナミクスの理解を目指し、金属相である室温の NbSe₂ に対し高次高調波特性を調べた。バルク金属では、電磁場が遮蔽されて試料内部に強い電場を印可することが困難という問題がある。我々は機械剥離によって侵入長より十分薄い NbSe₂ 試料を作成することで、金属からの高次高調波発生を観測する上での問題点を克服した。実際の実験では 9 次までの高次高調波を NbSe₂ から観測することに成功し、また高次高調波に加えて無偏光で幅広いスペクトルをもつ放射が生じていることが分かった。数値計算との比較によって、強電場によって高い運動エネルギーを持った電子が非線形電流(高次高調波)を誘起するとともに高速な電子間散乱によって数千 K の高温な電子状態が実現し、そこからの熱放射が観測された無偏光の広帯域放射スペクトルをもたらしていることが分かった。加えて、金属の高次高調波の摂動論からのずれ(非摂動論的応答)の起源が、運動量空間上で電子分布が平衡状態から大きく変化することで有効的な電子散乱レートが上昇することを明らかにした。このことは高速な電子間散乱が金属の

強電場下ダイナミクスにおいて支配的な寄与をもたらすことを示している。この成果は、共同研究者の学生が国際学会等で発表し現在論文の投稿準備中である。

(2) 黒リンにおける高次高調波を利用した遷移双極子モーメント構造の取り出し

金属や相転移材料の高次高調波特性を理解するためには半導体などのこれまで研究されてきた物質における高次高調波を深く理解する必要がある。本研究では、従来調べられてきた可視から紫外にバンドギャップをもつ半導体・絶縁体ではなく狭いバンドギャップをもつファンデルワールス層状物質の一種である黒リンにおいて高次高調波特性を調べた。狭バンドギャップ半導体では、狭いギャップによるキャリア生成効率が高く、金属・半金属と半導体・絶縁体の中間的な高次高調波特性が生ずることが期待される。結果として黒リンにおける高次高調波の偏光特性は、結晶方位を変えると劇的に変化することが分かった。これは我々の実験では、狭いギャップに共鳴な条件で中赤外光励起をすることで電子の運動量空間上での軌道を制限し電子構造の異方性が平均化されずに直接反映されたためであることが分かった。そこで、偏光特性の異方性から遷移双極子モーメントとよばれる光学応答を決定するパラメータを高次高調波特性の取り出しを試みた。原子系の高次高調波を記述するスリーステップモデルを適用することで近似的な高次高調波の偏光特性と遷移双極子モーメントの関係式を導き、運動量空間上での大域的な電子構造を明らかにした。このことは適切な実験条件では、高次高調波は電子構造を取り出せることを示唆する結果である。この結果を国際学会等で発表し、論文として発表した。

(3) 電荷秩序型絶縁体 Ti_4O_7 における相転移に伴う高調波特性の変化

相転移材料において、相転移に伴った電子構造の変化と非線形光学特性の対応を明らかにすることを目的として、 Ti_4O_7 において高次高調波発生特性を調べた。 Ti_4O_7 は高温相・中間相・低温相という3つの電荷秩序が異なる相をもっており、電荷秩序形成にともない金属から絶縁体へと電子構造が変化することが知られ、さらにパルス光による励起で光誘起相転移する。このような Ti_4O_7 の特性は、相転移に伴う電子構造と高調波の対応関係を調べる上で理想的な材料である。そこでまず Ti_4O_7 の各相の電子構造と高調波の対応関係を調べた。 Ti_4O_7 では高調波発生効率は、同一相内の温度範囲ではほとんど変化しない一方、相転移を跨ぐことで不連続に変化し低温の相ほど発生効率が高くなる傾向が得られた。励起中赤外光の反射率の温度変化を考慮に入れても、数倍～数十倍の発生効率の増大が相転移に伴っていることが分かり、強い光電場下の電子ダイナミクスが電子構造の変化によって大きく変化することを示している。さらに結晶方位依存性を調べると各相で発生効率が最大となる光電場の印可方向が大きく異なることが分かった。興味深いことに低温相での高調波発生効率が最大となる電場方向は、 Ti のダイマーが形成されギャップが開く方向、すなわち電荷の自由な運動が妨げられる方向と対応している。このことはギャップ形成にともなったコヒーレントキャリア形成における非線形性が高次高調波の発生源となっていることを示唆する結果である。この成果は共同研究者とともに国内学会で発表し、現在、論文の投稿準備中である。

(4) WTe_2 における光誘起相転移の超高速分光

光誘起相転移に伴う高次高調波特性の変化の測定を念頭に、まず光誘起相転移メカニズムを調べるために従来型のポンププローブ分光測定をワイル半金属である $Td-WTe_2$ において行った。 $Td-WTe_2$ では、これまでテラヘルツ帯から近赤外域の高強度な光を照射することでワイル半金属からワイル点の消失した通常半金属相へと相転移することが知られてきた。最近、数値計算によって $Td-WTe_2$ では特定の励起波長と励起偏光では従来観測されてきた相転移とはことなりワイル点の数の異なる相へと変化すると予測がなされた。本研究では偏光依存した光誘起相転移が実際に $Td-WTe_2$ で生じているかを検証するため、赤外光ポンプ第2次高調波プローブ分光を行った。結果として理論的な予測に反して、光誘起相転移は波長や偏光によらず従来報告されてきた通常半金属相へと転移することが分かった。さらに理論予測に反した応答を示す起源を明らかにするために偏光分解赤外ポンプ・プローブ実験を行った。その結果、理論予測の前提となる偏光に依存して生成される異方的な電子分布が高速な電子散乱によって光誘起相転移が始まる前に等方的な分布に緩和してしまうことがその起源であることが分かった。この結果をまとめて、論文として出版した。

(5) モット絶縁体 Ca_2RuO_4 における高次高調波

高次高調波における電子相関の効果を調べるために、典型的な2次元モット絶縁体である Ca_2RuO_4 において高次高調波特性の温度依存性を詳細に調べた。 Ca_2RuO_4 では、温度に依存してモットギャップエネルギーが大きく変化し、この特性を利用することで強相関性に起因したギャップエネルギーと高調波特性の関係を明らかにすることができる。実際に結晶温度を低温すると高次高調波の発生効率が劇的に増大し9次高調波では室温から50Kで200倍以上の増大を示すことが分かった。この結果とギャップエネルギーの温度依存性を利用して、ギャップエネルギーに対する高次高調波強度の変化を調べた。結果として、ギャップエネルギーの増大に対して高次高調波発生の効率が指数的に増大することが分かった。さらに入力光子エネルギーに対する依存性も調べることで、高次高調波発生の温度依存性は、高調波放射エネルギーとギャップエネルギーのみに依存した単純な法則に従うことを発見した。高次高調波発生は強電場下での複

雑な電子ダイナミクスを反映した応答であり、発見された単純な法則に従うことは大きな驚きである。この成果は、電子相関が高次高調波特性に大きな寄与を持つこと、効率的な非線形光学材料の設計指針を与えるものである。この成果を、国内学会等で発表し、論文として発表した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Nagai Kohei, Uchida Kento, Yoshikawa Naotaka, Endo Takahiko, Miyata Yasumitsu, Tanaka Koichiro	4. 巻 3
2. 論文標題 Dynamical symmetry of strongly light-driven electronic system in crystalline solids	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42005-020-00399-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Nishidome Hiroyuki, Nagai Kohei, Uchida Kento, Ichinose Yota, Yomogida Yohei, Miyata Yasumitsu, Tanaka Koichiro, Yanagi Kazuhiro	4. 巻 20
2. 論文標題 Control of High-Harmonic Generation by Tuning the Electronic Structure and Carrier Injection	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 6215 ~ 6221
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.0c02717	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Uchida K., Pareek V., Nagai K., Dani K. M., Tanaka K.	4. 巻 103
2. 論文標題 Visualization of two-dimensional transition dipole moment texture in momentum space using high-harmonic generation spectroscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.L161406	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Uchida K., Nagai K., Yoshikawa N., Tanaka K.	4. 巻 101
2. 論文標題 Inherent limit to coherent phonon generation under nonresonant light-field driving	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.094301	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshikawa Naotaka, Nagai Kohei, Uchida Kento, Takaguchi Yuhei, Sasaki Shogo, Miyata Yasumitsu, Tanaka Koichiro	4. 巻 10
2. 論文標題 Interband resonant high-harmonic generation by valley polarized electron-hole pairs	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-019-11697-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Uchida K., Pareek V., Nagai K., Dani K. M., Tanaka K.	4. 巻 103
2. 論文標題 Visualization of two-dimensional transition dipole moment texture in momentum space using high-harmonic generation spectroscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L161406
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.L161406	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Uchida K., Mattoni G., Yonezawa S., Nakamura F., Maeno Y., Tanaka K.	4. 巻 128
2. 論文標題 High-Order Harmonic Generation and Its Unconventional Scaling Law in the Mott-Insulating Ca ₂ RuO ₄	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 127401
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.128.127401	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Aoki Ryota, Uchida Kento, Tanaka Koichiro	4. 巻 12
2. 論文標題 Excitation polarization-independent photo-induced restoration of inversion symmetry in Td-WTe ₂	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 045309 ~ 045309
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0086398	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計27件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 高階君佳, 岸岡あかり, 内田健人, 松永哲也, 首藤健一, 玉置亮, 武田淳, 田中耕一郎, 片山郁文
2. 発表標題 六方晶Ti単結晶における異方的高次高調波発生の起源
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡辺雅之, 内田健人, 田中耕一郎
2. 発表標題 電荷秩序型絶縁体Ti407における光ポンプ高次高調波プローブ分光
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 内田健人, 草場哲, 永井恒平, 田中耕一郎
2. 発表標題 単層WSe ₂ におけるフロッケ状態形成による励起子分極の生成
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 永井恒平, 内田健人, 草場哲, 遠藤尚彦, 宮田耕充, 田中耕一郎
2. 発表標題 単層WSe ₂ の高次高調波発生におけるインコヒーレントキャリアの影響
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 青木涼太, 内田健人, 田中耕一郎
2. 発表標題 ワイル半金属WTe ₂ における光誘起相の励起波長・偏光依存性
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西留比呂幸, 永井恒平, 内田健人, 河原憲治, 枝淳子, 大久保瞳, 蓬田陽平, 吾郷浩樹, 田中耕一郎, 柳和宏
2. 発表標題 金属型単層カーボンナノチューブとグラフェンにおける高次高調波発生のフェルミレベル依存性
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 内田健人, 坂本実, 渡辺雅之, 田中耕一郎
2. 発表標題 励起子絶縁体候補物質Ta ₂ NiSe ₅ およびTa ₂ NiS ₅ における高次高調波分光
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中野愛子, 内田健人, 富岡泰秀, 沖本洋一, 田中耕一郎
2. 発表標題 電荷秩序状態におけるPr _{0.6} Ca _{0.4} MnO ₃ の高次高調波発生
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kento Uchida, Vivek Pareek, Kohei Nagai, Keshav Dani, Koichiro Tanaka
2. 発表標題 Transition dipole moment structure revealed by high harmonic generation spectroscopy in thin layer black phosphorus
3. 学会等名 CLEO/Europe-EQEC (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kohei Nagai, Kento Uchida, Satoshi Kusaba, Takahiko Endo, Yasumitsu Miyata, Koichiro Tanaka
2. 発表標題 High-harmonic generation in monolayer WSe2 under photo-carrier doping
3. 学会等名 CLEO/Europe-EQEC (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kohei Nagai, Kento Uchida, Satoshi Kusaba, Takahiko Endo, Yasumitsu Miyata, and Koichiro Tanaka
2. 発表標題 Photo-carrier doping effect on high-order harmonic generation in monolayer WSe2
3. 学会等名 IRMMW-THz 2020, Buffalo, New York, USA (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 永井恒平, 内田健人, 遠藤尚彦, 宮田耕充, 田中耕一郎
2. 発表標題 薄層WSe2における高次高調波発生の光キャリアドーピング効果
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡辺雅之, 小西隆士, 内田健人, 田中耕一郎
2. 発表標題 Ti407における金属絶縁体転移に対する高次高調波の方位依存性の変化
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 内田健人, Giordano Mattoni, 成田秀樹, 米澤進吾, 中村文彦, 前野悦輝, 田中耕一郎
2. 発表標題 Ca2RuO4における高次高調波の温度依存性
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中野愛子, 内田健人, 田中耕一郎
2. 発表標題 LaMnO3における高次高調波発生
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 内田健人, 草場哲, 田中耕一郎
2. 発表標題 2次元半導体 WSe_2 における高強度中赤外光誘起の励起子共鳴蛍光
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡辺雅之, 内田健人, 田中耕一郎
2. 発表標題 Ti407における高次高調波の励起強度依存性
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 内田健人, Vivek Pareek, 永井恒平, Keshav. M. Dani, 田中耕一郎
2. 発表標題 共鳴励起高次高調波発生を利用した運動量空間中での遷移双極子モーメント構造の可視化
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高階君佳, 内田健人, 田中耕一郎, 松永哲也, 御手洗容子, 金島圭佑, 武田淳, 片山郁文
2. 発表標題 高調波発生を用いた金属チタンにおける電子状態の異方性計測
3. 学会等名 第68回応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kento Uchida, Vivek Pareek, Kohei Nagai, Kesav M Dani, Koichiro Tanaka
2. 発表標題 Breakdown of the quasi-1D nature of black phosphorus in non-perturbative higher harmonic generation
3. 学会等名 CLEO Europe (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kousei Shimomura, Kento Uchida, Kohei Nagai, Satoshi Kusaba and Koichiro Tanaka
2. 発表標題 High Harmonic Generation In Metallic Phase Of 2H-NbSe2
3. 学会等名 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 内田健人
2. 発表標題 薄膜半導体・金属における高次高調波発生
3. 学会等名 第29回日本MRS年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 内田健人
2. 発表標題 半導体・金属薄膜からの高次高調波発生
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡辺雅之, 内田健人, 田中耕一郎
2. 発表標題 Ti407における金属絶縁体転移による高次高調波発生の変化
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 永井 恒平,内田 健人, 遠藤 尚彦, 宮田 耕充, 田中 耕一郎
2. 発表標題 遷移金属ダイカルコゲナイド単層薄膜における高次高調波発生の光キャリアドーピング効果
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中野愛子, 内田健人, 下村耕生, 田中耕一郎
2. 発表標題 1T-TaS2 薄膜の高次高調波発生
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西留比呂幸, 永井恒平, 内田健人, 一ノ瀬遥太, 福原健吾, 枝淳子, 大久保瞳, 蓬田陽平, 田中耕一郎, 柳和宏
2. 発表標題 単層カーボンナノチューブにおけるTHz高次高調波発生のキャリア注入依存性2
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------