

令和 2 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H04816

研究課題名(和文) 数サイクル高強度中赤外電界下の固体の極限応答探索

研究課題名(英文) Exploring extreme response of solids exposed to intense few-cycle mid-infrared electric fields

研究代表者

石井 順久 (Ishii, Nobuhsa)

東京大学・物性研究所・助教

研究者番号：40586898

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,500,000円

研究成果の概要(和文)：固体の高強度電場下における極端な非線形応答を探索した。中赤外のスペクトル領域において高強度フェムト秒レーザーを開発し、固体内で10 MV/cm以上の電界を非破壊的に印加することに成功した。その結果、固体内の電子応答は極端に非線形な応答を示し、紫外にわたる高次高調波と呼ばれる、レーザーの周波数の整数倍となる放射が観測された。この放射を偏光分解することにより、固体内のバンド曲率が計測できることを見出した。その他にも、高次高調波発生における選択側の世界で初めての実証や反射高調波の観測からの高強度中赤外光パルスの伝搬効果について研究成果を挙げた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高強度電界下の物質応答やその絶縁破壊は、近年の高速エレクトロニクスやスイッチング、並びにリーク電流問題と密接にかかわっており、これからさらなる高速化が進む、情報社会基盤における先駆的な研究であると思われる。

また光学分野においても、紫外線領域では物質の屈折率が低く透過率が低いために、偏光光学素子を作成することが非常に困難である。極限的非線形光学効果を用いて赤外光源の制御と固体高調波発生媒質の人工構造成型により、紫外高調波の偏光制御が可能となり、紫外の分光実験への適応が可能となる。

研究成果の概要(英文)：We have explored extremely nonlinear response of solid. We have developed an intense femtosecond laser in the mid-infrared region of the spectrum, allowing the application of more than 10 MV/cm electric fields in solids without optical damage. As a result, the response of electrons in solids exhibits extremely nonlinearity, generating high harmonics up to the ultraviolet region, which consist of comb-like spectral components that have integer multiple of the laser frequency. The polarization resolved study of the high harmonics directly allows us to determine the band curvature of the lowest conduction band of solids. In other experiments, we have demonstrated the selection rules in solid high harmonics generation experimentally for the first time. Additionally, we have detected the reflected high harmonics from solid interfaces, which reveals the propagation effect of intense mid-infrared pulses on high harmonic generation in solids.

研究分野：超高速レーザー開発とその応用

キーワード：超高速赤外レーザー 固体 非線形効果 高次高調波

## 1. 研究開始当初の背景

高強度パルスレーザー技術の進展により、高強度電場下の物質の非線形応答に関する研究分野が劇的な発展を遂げた。特に、高強度電場と気相の原子・分子との相互作用について、アト秒の時間幅で起こるトンネルイオン化、光電子のコヒーレントな運動、電子波束と原子・分子との量子力学的な相互作用などについての理解が進み、「アト秒科学」という分野の研究が盛んになっていた[1]。

近年、光パルスの持続時間が電場サイクル(波長 800 nm で 2.67 フェムト秒)の数個分である数サイクル光パルスの発生が可能となっている。高強度光パルスを固体に照射すると、価電子が伝導帯に励起され、さらに伝導帯内で長時間加速され多数回の衝突電離を起こし、指数関数的に電子を励起し、物質が破壊にいたる。一方、数サイクルパルスでは価電子を伝導帯に打ち上げ、瞬時的に加速はするものの、その時間は短く、衝突電離の頻度を極度に低く抑えられる。このことから、瞬時的な強電場を印加可能になり、実効的に破壊閾値が上がる。瞬時的な強電界により極端な非線形現象が生じ、例えばバンドギャップを超えるレーザーの高次高調波発生が観測されている[2]。

現在までのところ、これらの研究は実証実験的要素が強く、非線形現象を1次元系周期的ポテンシャル上で現象論的に説明しており、さらなる理解には研究の進展が必要であった。

[1] P. B. Corkum and F. Krausz, Nat. Physics 3, 381 (2007).

[2] S. Ghimire, et al., Nat. Physics 7, 138 (2011).

## 2. 研究の目的

古典的な非線形現象(特に非線形光学現象)において、系の応答は摂動展開された弱電場の冪乗に比例する非線形項の結果として発現した。これは結晶内のバンド間分極または点近傍のバンド内電流が主たる原因で物理現象が発現しているということである。本研究では、数サイクル赤外高強度パルス発生技術の進展と共に可能となった、破壊閾値ぎりぎりの強電界を固体に印加して、図1(グラフェンライクな六方対称の結晶の伝導バンド構造)のようにイオン化して生成した伝導電子の波束をブリルアンゾーン内全域にわたって駆動し、その系の極端な非線形応答を発現させる。交流電界下では点を中心に電子波束が振動し、電子軌道1, 2は電界の結晶に対する方向の違いを表す。

ここで、以下の数式のように、伝導電子の運動をボルツマン方程式で記述し、伝導電流による応答を時間依存する電子波束の運動量( $k$ )、電子速度( $v$ )、電流( $j$ )を用いて考える。

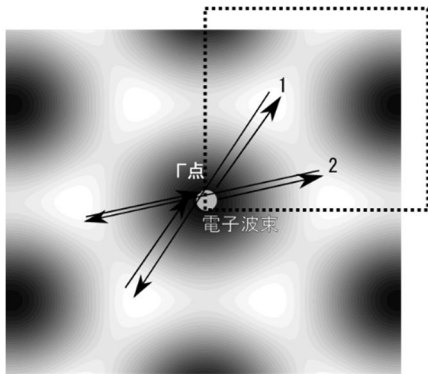


図1: Hexagonal 結晶の2次元伝導帯バンド分散と伝導帯底(点)にイオン化した電子波束の強電界中の運動の例1, 2。

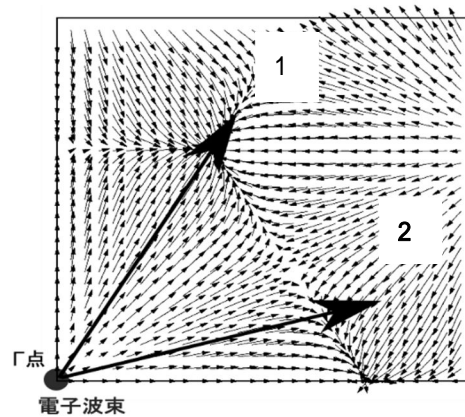


図2: 図1の点線枠内のバンドの勾配(2次元ベクトル量, 矢印の向きと長さで表現). 矢印1, 2は電子波束の運動方向。

$$\vec{k}(t) = \vec{k}(0) + \frac{e}{\hbar} \vec{A}(t) \quad (1),$$

$$\vec{v}_g(\vec{k}) = \frac{1}{\hbar} \frac{\partial}{\partial \vec{k}} \varepsilon(\vec{k}(t)) \quad (2),$$

$$\vec{j}(t) = e \int f(\vec{k}(t)) \vec{v}_g(\vec{k}) d\vec{k} \quad (3)$$

強電界中で価電子帯から伝導帯に励起された電子波束はベクトルポテンシャルにしたがってブリルアンゾーン内を移動する。数サイクルパルスでは 10-100 V/nm の電界が非破壊的に印加可能であり、伝導電子はゾーン端を超え、折り返し、符号が逆の波数に波束を形成する（ブロッホ振動）。バンド内電流による光放射（式(3)）は電流速度（式(2)）に比例し、電流速度はバンドの勾配に比例する。図2はバンドの勾配をプロットで、例えば、電子軌道1では電流は常に電場の方向（向きは問わず）を向いているが、電子軌道2では電流はバンド端において直交成分が発生する。またベクトルポテンシャルが最大になるときに、放射が傾くと予想され、時間分解して偏光測定を行えば、バンドの勾配の度合いとブリルアンゾーン内の位置が2次的に解明でき、角度依存性を測定することにより、バンド形状が測定できる。強電界でドライブした非線形現象にはブリルアンゾーン全域の情報が反映されており、古典的非線形現象が点付近のみであったのと対照的に、より物質固有の情報を取り出すことができると考えられる。これらは現在までの実験結果から予想されている描像であり、さらなる実験と理論両面からの探索が不可欠である。

本研究では高強度数サイクル赤外パルスを高強度化して、特異な非線形現象を駆動し、主に、高次高調波の偏光情報、時間情報、空間情報から物質特有の情報を多次元系において抜き出す。また準直流電界下の吸収分光を通して、強電界下でのバンド描像の妥当性を検証し、強電界下での固体の応答に適したモデルの構築を目指す。理論的側面では、半導体ブロッホ方程式に基づくシミュレーションや第一原理計算等の手法（理論家との共同研究を通して）で極限非線形現象を解明する。デバイス応用という観点で、レーザー電場制御と固体構造の作りこみにより、高調波の特性を制御可能であり、紫外高調波の特性制御が可能とする。

### 3. 研究の方法

固体電子駆動用高強度レーザー光源として、研究代表者が開発した数サイクル赤外光源をベースとして使用する。数サイクル光源を増強して、ベース光源とフェムト秒以下で同期した、中赤外光、可視光を生成する。高強度中赤外光で発生させた高調波の偏光、時間、空間特性を中赤外分光器で、または可視、紫外域でレファレンスとのクロスコリレーションで測定する。またサブサイクル（準直流電圧下）での過渡吸収を測定し、半導体の動的エネルギー変化の追跡を行う。理論的側面では、実験結果の(1)自前の半導体ブロッホ方程式シミュレーターによる現象論的解析と簡便なモデリングによる再現、また(2)大規模第一原理計算専門の理論家との共同研究を通し、バンド理論の枠組みを超えたシミュレーションによる再現を試みる。これらから強電場下の固体ダイナミクスの理論的枠組みの構築をおこなう。図3に研究計画・方法と目的の概要図を示している。

### 4. 研究成果

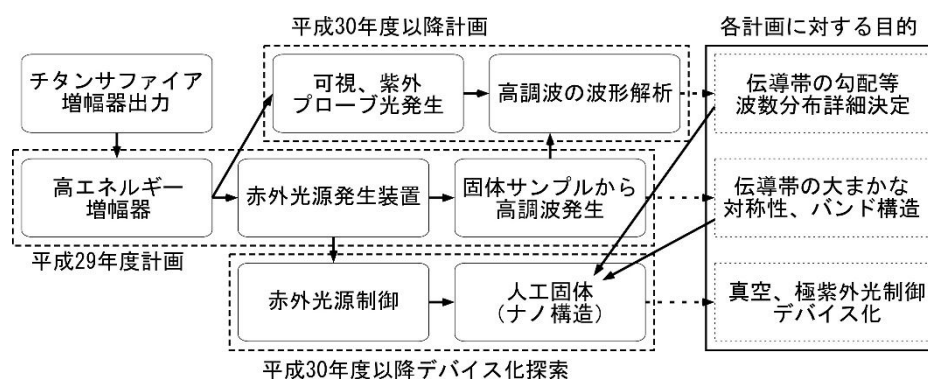


図3：研究方法の各開発項目間の関係

固体における高強度電場下の探索を行うため、中赤外光源を開発した[3]。中赤外光源は波長3.5マイクロメートル、パルス当たりのエネルギーが約120マイクロジュールであり、高次高調波発生実験のために十分な強度がある。この中赤外光源についてはさらなるパルス圧縮化を含めた研究成果になっている。

より波長の長い5マイクロメートルにレーザー光源を改良し、高調波発生実験を行った。セレン化ガリウム GaSe からの奇数次の高調波の偏光が曲がることを見出し、理論の研究室との共同研究により、GaSe の最低伝導帯のバンドの逆有効質量と関連付けられることを世界で初めて実証し、理論的な式を演繹した[4]。

これまで理論的に予言されていたが、実証されていない、円偏光中赤外励起の高調波発生における選択則を実験的に実証した[5]。

GaAs からの高調波発生を世界で初めて反射配置で行い、バンドギャップを越える高次高調波発生に成功した。高次高調波発生の透過配置と反射配置では発生した高次高調波のスペクトル形

状が全く異なり、反射配置における高調波のスペクトルが固体の応答を正しく再現していることが分かった。透過配置で計測した高次高調波発生から、固体内を高強度電場が伝搬する効果について、高次高調波発生から明らかにした。

高次の高調波発生を反射配置で行うことはこれまで世界で例がなく、またこの配置が固体の非線形応答を正しく予測できることから、これからの主流な実験手法となることが予想される[6]。

平成 29 年度に開発した中赤外光源を用いて、固体に印加している最中の、過渡的なタイミングで可視光のプローブを入れ、固体の透過・反射スペクトルを測定した。バンド構造を調べるための中赤外の波長で決まる振動時間（6000 nm で 20 フェムト秒）より短いプローブ光の同期システムを開発した。

紫外線は化学反応追跡、光電子分光等の応用範囲が大きいスペクトル領域ではあるが、物質の屈折率が低く、透過率が低いために、光学素子を作成することが非常に困難かつ高額である。極限的非線形光学効果を用いて赤外光源の制御と固体高調波発生媒質の人工構造成型を通して、紫外高調波の偏光制御を行うことにより、光電子分光等の紫外光源として有用であることを実証した。固体高調波発生では、発生に必要な強度が気体よりも低く抑えられており、高調波発生に必要なエネルギーが低く高繰り返し化可能であり適合性が良い知見を得た。

[3] F. Lu, et al., Opt. Lett. 43, 2720-2723 (2018).

[4] K. Kaneshima, et al., Phys. Rev. Lett. 120, 243903 (2018).

[5] N. Saito, et al., Optica 4, 1333-1336 (2017).

[6] P. Xia, Opt. Express 26, 29393-29400 (2018).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Nariyuki Saito, Nobuhisa Ishii, Teruto Kanai, and Jiro Itatani,	4. 巻 26
2. 論文標題 All-optical characterization of the two-dimensional waveform and the Gouy phase of an infrared pulse based on plasma fluorescence of gas	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 24591-24601
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.26.024591	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 Keisuke Kaneshima, Yasushi Shinohara, Kengo Takeuchi, Nobuhisa Ishii, Kotaro Imasaka, Tomohiro Kaji, Satoshi Ashihara, Kenichi L. Ishikawa, and Jiro Itatani	4. 巻 120
2. 論文標題 Polarization-Resolved Study of High Harmonics from Bulk Semiconductors	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 243903
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.120.243903	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 Faming Lu, Peiyu Xia, Yoshiyuki Matsumoto, Teruto Kanai, Nobuhisa Ishii, and Jiro Itatani	4. 巻 43
2. 論文標題 Generation of sub-two-cycle CEP-stable optical pulses at 3.5 um from a KTA-based optical parametric amplifier with multiple-plate compression	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 2720-2723
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1364/OL.43.002720">https://doi.org/10.1364/OL.43.002720</a>	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 Peiyu Xia, Changsu Kim, Faming Lu, Teruto Kanai, Hidefumi Akiyama, Jiro Itatani, and Nobuhisa Ishii,	4. 巻 26
2. 論文標題 Nonlinear propagation effects in high harmonic generation in reflection and transmission from gallium arsenide	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 29393-29400
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.26.029393	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 Kozo Okazaki, Yu Ogawa, Takeshi Suzuki, Takashi Yamamoto, Takashi Someya, Shoya Michimae, Mari Watanabe, Yangfan Lu, Minoru Nohara, Hidenori Takagi, Naoyuki Katayama, Hiroshi Sawa, Masami Fujisawa, Teruto Kanai, Nobuhisa Ishii, Jiro Itatani, Takashi Mizokawa, and Shik Shin,	4. 巻 9
2. 論文標題 Photo-induced semimetallic states realised in electron-hole coupled insulators	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 4322
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-018-06801-1	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 Hideki Hirori, Peiyu Xia, Yasushi Shinohara, Tomohito Otobe, Yasuyuki Sanari, Hirokazu Tahara, Nobuhisa Ishii, Jiro Itatani, Kenichi L. Ishikawa, Tomoko Aharen, Masashi Ozaki, Atsushi Wakamiya, and Yoshihiko Kanemitsu	4. 巻 7
2. 論文標題 High-order harmonic generation from hybrid organic-inorganic perovskite thin films	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 APL Materials	6. 最初と最後の頁 41107
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5090935	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 Saito Nariyuki, Xia Peiyu, Lu Faming, Kanai Teruto, Itatani Jiro, Ishii Nobuhisa	4. 巻 4
2. 論文標題 Observation of selection rules for circularly polarized fields in high-harmonic generation from a crystalline solid	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Optica	6. 最初と最後の頁 1333 ~ 1333
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1364/OPTICA.4.001333">https://doi.org/10.1364/OPTICA.4.001333</a>	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 Ishii Nobuhisa, Kaneshima Keisuke, Kanai Teruto, Watanabe Shuntaro, Itatani Jiro	4. 巻 20
2. 論文標題 Generation of sub-two-cycle millijoule infrared pulses in an optical parametric chirped-pulse amplifier and their application to soft x-ray absorption spectroscopy with high-flux high harmonics	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Optics	6. 最初と最後の頁 014003 ~ 014003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1088/2040-8986/aa99ed">https://doi.org/10.1088/2040-8986/aa99ed</a>	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 Yamamoto Sh., Oumbarek D., Fujisawa M., Someya T., Takahashi Y., Yamamoto T., Ishii N., Yaji K., Yamamoto S., Kanai T., Okazaki K., Kotsugi M., Itatani J., Shin S., Matsuda I.	4. 巻 222
2. 論文標題 Resonant magneto-optical Kerr effect measurement system with polarization analysis using a high harmonic generation laser	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena	6. 最初と最後の頁 68 ~ 73
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1016/j.elspec.2017.09.001">https://doi.org/10.1016/j.elspec.2017.09.001</a>	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 Someya Takashi, Fukidome Hirokazu, Watanabe Hiroshi, Yamamoto Takashi, Okada Masaru, Suzuki Hakuto, Ogawa Yu, Iimori Takushi, Ishii Nobuhisa, Kanai Teruto, Tashima Keiichiro, Feng Baojie, Yamamoto Susumu, Itatani Jiro, Komori Fumio, Okazaki Kozo, Shin Shik, Matsuda Iwao	4. 巻 95
2. 論文標題 Suppression of supercollision carrier cooling in high mobility graphene on SiC(0001 )	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 165303
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevB.95.165303">https://doi.org/10.1103/PhysRevB.95.165303</a>	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 Suzuki H., Okazaki K., Yamamoto T., Someya T., Okada M., Koshiishi K., Fujisawa M., Kanai T., Ishii N., Nakajima M., Eisaki H., Ono K., Kumigashira H., Itatani J., Fujimori A., Shin S.	4. 巻 95
2. 論文標題 Ultrafast melting of spin density wave order in BaFe2As2 observed by time- and angle-resolved photoemission spectroscopy with extreme-ultraviolet higher harmonic generation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 165112
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevB.95.165112">https://doi.org/10.1103/PhysRevB.95.165112</a>	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 -

〔学会発表〕 計16件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Nobuhisa Ishii
2. 発表標題 Polarization properties of high harmonics in solids using linearly and circularly polarized infrared optical pulses
3. 学会等名 The 9th Asian Workshop on Generation and Application of Coherent XUV and X-ray Radiation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nariyuki Saito, Nobuhisa Ishii, Teruto Kanai, and Jiro Itatani,
2. 発表標題 Complete characterization of an optical waveform by luminescence from gas plasma
3. 学会等名 The 7th Advanced Lasers and Photon Sources (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石井順久
2. 発表標題 固体における強光子場科学のための中赤外光源開発
3. 学会等名 第39回レーザー学会学術講演会(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三戸宏樹、齋藤成之、石井順久、金井輝人、板谷治郎
2. 発表標題 「水の窓」全域にわたる軟 線高調波発生
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 夏沛宇、金昌秀、Faming Lu、石井順久、金井輝人、秋山英文、板谷治郎
2. 発表標題 反射配置でのGaAsからの高次高調波発生と伝搬効果の評価
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 水野智也、Dagar Ritika、竹内健悟、石井順久、金井輝人、板谷治郎
2. 発表標題 高強度赤外電場による光電子放出過程の搬送波包絡線位相依存性
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 夏 沛宇、Lu Faming、金島 圭佑、石井 順久、金井 輝人、板谷 治郎
2. 発表標題 固体のサブサイクル分光に向けての3.5um帯CEP安定中赤外パルスの電気光学サンプリング
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤 成之、三戸 宏樹、石井 順久、金井 輝人、板谷 治郎
2. 発表標題 高次高調波を用いた400 eVにおける窒素分子の時間分解軟X線吸収分光
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nobuhisa Ishii, Keisuke Kaneshima, Yasushi Shinohara, Kengo Takeuchi, Kenichi L. Ishikawa, Jiro Itatani
2. 発表標題 Ellipsometry of high harmonics generated from gallium selenide irradiated by mid-infrared pulses
3. 学会等名 6th International Conference on Attosecond Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名	Nobuhisa Ishii, Keisuke Kaneshima, Yasushi Shinohara, Kengo Takeuchi, Kenichi L. Ishikawa, Jiro Itatani
2. 発表標題	Polarization property of high harmonics generated from crystalline semiconductors excited by mid-infrared pulses
3. 学会等名	The European Conference on Lasers and Electro-Optics (国際学会)
4. 発表年	2017年

1. 発表者名	Faming Lu, Teruto Kanai, Peiyu Xia, Nobuhisa Ishii, Jiro itatani
2. 発表標題	Ellipsometry of high harmonics in GaSe pumped by 3.3 $\mu\text{m}$ optical parametric amplifiers
3. 学会等名	第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年	2017年

1. 発表者名	竹内 健悟、水野 智也、金島 圭佑、金井 輝人、石井 順久、板谷 治郎
2. 発表標題	ナノチップにおける中赤外電場増強と光電子放出
3. 学会等名	第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年	2017年

1. 発表者名	梶 智博、今坂 光太郎、金島 圭佑、石井 順久、板谷 治郎、芦原 聡
2. 発表標題	固体結晶GaSeにおける深紫外域の高次高調波発生
3. 学会等名	第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年	2017年

1. 発表者名 齋藤 成之、石井 順久、金井 輝人、渡部 俊太郎、板谷 治郎
2. 発表標題 結晶対称性によって制御された固体からの円偏光高調波発生
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 水野 智也、竹内 健悟、Geiseler Henning、石井 順久、金井 輝人、板谷 治郎
2. 発表標題 高エネルギー光電子用運動量画像計測装置の開発と高強度赤外電場中での光イオン化過程
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 石井 順久
2. 発表標題 固体高調波分光における偏光とサブサイクル時間分解
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

固体結晶からの高次高調波発生の偏光分解測定 高調波の偏光に電子状態の異方性が映し出されることを実証  
<http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/news2.html?pid=5281>

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
--	---------------------------	-----------------------	----