

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域
「先端光源を駆使した光科学・光技術の融合展開」

研究課題
「高強度テラヘルツ光による究極的分光技術開拓と物性
物理学への展開」

研究終了報告書

研究期間 平成21年10月～平成27年3月

研究代表者：田中耕一郎
(京都大学大学院理学研究科・教授)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

本研究はフェムト秒レーザーをもちいた高強度テラヘルツ光発生技術を高度化し、究極的なテラヘルツ分光技術の開拓とその物性物理学や生命科学への展開を目的とした。そのために、京都大学、広島大学、早稲田大学、オリンパス(株)からなる研究チームを構成し、研究をすすめた。高強度テラヘルツ光源として、シングルサイクルパルスの超短パルステラヘルツ光源と数十サイクルパルスの挟線幅波長可変テラヘルツ光源の2つの光源を開発した。超短パルステラヘルツ光源をもちいて、半導体における超高速伝導現象や非線形光学応答に関して新奇な現象を発見した。また、これまでにない実時間で動作するテラヘルツ近接場顕微鏡の開発をおこない、様々なデバイスや材料、生細胞の時空間テラヘルツ電磁場イメージングに成功した。さらに、数十サイクルパルスの挟線幅波長可変テラヘルツ光源をもちいて、半導体の電子励起状態の非摂動領域の光学現象を見いだした。これらの研究成果を、原著論文(欧文誌)38件、国際学会招待講演43件、国際学会口頭発表37件によって発表するとともに、付随して得られた知的財産を確保した(国内特許出願:11件、国際特許出願:1件)。また、本研究プロジェクトの成果を対象に8件の表彰を受けるなど、内外から高い評価をうけた。以上のように、新規に開発した高強度テラヘルツ光源によって、これまでに見られなかったような非線形光学応答の発見やテラヘルツ近接場顕微鏡の構築に成功し、物性物理学へ大きな展開を示せたことから、当初の研究目的は達成された。以下では、特筆すべき成果を列挙する。

1. 京都大学グループにおいて中心周波数 1THz で 1MV/cm 以上の電場強度をもつシングルサイクルパルスの高強度テラヘルツ光の発生に成功した(原著論文6)。これは、開発時点で世界最高の性能を示しており、高く評価された。
2. 上記のシングルサイクルテラヘルツパルス光を広島大学グループで作製した半導体量子井戸に照射することにより、1000倍以上のキャリア増幅が1ピコ秒以内に生じることを明らかにした(原著論文9)。また、金属構造体によってさらなる電場増強をおこなったテラヘルツ光を半導体に照射することにより、ゼナートンネル効果を誘起することに成功した。これらの結果は「限界光駆動半導体物理」とでも呼ぶべき学術分野の先駆けである。
3. 早稲田大学グループで基礎的な開発をおこなった挟線幅波長可変テラヘルツ光源を京都大学グループが高強度化することによって、高強度波長可変テラヘルツ光源を実現した。このテラヘルツ光の照射により、半導体量子井戸の励起子状態において非摂動論領域の巨大な非線形光学応答が生じることを明らかにした。
4. 空気プラズマをもちいたシングルサイクルパルスの高強度テラヘルツ光により高電場下におけるグラフェン中の電子ダイナミクスをサブピコ秒の時間分解能で明らかにした。キャリアが熱化する以前の超高速な輸送特性のミクロスコピックなメカニズムを明らかにすることに成功し、グラフェンのデバイス化に向けた基礎を固めた(原著論文19)。
5. 京都大学グループとオリンパス(株)の共同研究により、波長の 1/100 以下の空間分解能をもち、ビデオレートで実時間動作するテラヘルツ近接場顕微鏡を構築した(原著論文2、8、11、30)。テラヘルツ金属構造体デバイスや小さい結晶の電磁場応答を近接場の領域で解析可能であることを示した(原著論文18、35)。広島大学グループで開発したホーンアンテナをもちいたカップラーの電磁場解析にも威力を発揮し、テラヘルツデバイス構築のために強力な手段であることを示すことができた(原著論文26)。
6. 京都大学グループとオリンパス(株)の共同研究により、テラヘルツ近接場顕微鏡により生細胞の観察が可能であることを示した。特に、脂肪細胞においては位相イメージングが有効であることを明らかにした。

(2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1. 世界最高電場強度を有するテラヘルツシングルサイクル光源の開発に成功

H. Hirori, A. Doi, F. Blanchard, and K. Tanaka, "Single-cycle terahertz pulses with amplitudes exceeding 1 MV/cm generated by optical rectification in LiNbO₃", Appl. Phys. Lett. 98, 091106 (2011). (原著論文 6)

被引用件数: 164 件(WEB OF SCIENCE)、232 件(Google Scholar)

概要: フェムト秒パルスレーザーの LiNbO₃ 結晶内部での光整流過程を用いることによって、1 MV/cm の電場振幅を超える、世界最高強度のテラヘルツパルス光源の開発に初めて成功した。その集光強度は他のグループが開発した光源に比べて数十倍という強さに達し、国内外の多くの研究者によって同手法が採用されるなど、この分野で世界的なインパクトを与えた。

2. 高強度テラヘルツパルスの照射により半導体キャリアの1000倍にもおよぶ増幅に成功

H. Hirori, K. Shinokita, M. Shirai, S. Tani, Y. Kadoya, K. Tanaka, "Extraordinary carrier multiplication gated by a picosecond electric field pulse", Nature Communications, 2, 594 (2011). (原著論文 9)

被引用件数: 42 件(WEB OF SCIENCE)、65 件(Google Scholar)

概要: 高強度テラヘルツ光パルスを半導体試料(GaAs/AlGaAs 多重量子井戸)に照射することにより、量子井戸内の初期キャリアの約 1000 倍にも及ぶ巨大なキャリアの増幅に伴う、試料からの発光の観測に成功した。ピコ秒という瞬間的な高電場下では、キャリアは散乱のない弾道的運動をし、効率的な衝突イオン化を介したキャリア増幅を実現出来ることを示しており、今後の高強度電場下で動作する超高速半導体デバイスの新しい可能性として注目された。

3. 高強度テラヘルツパルスの照射によるグラフェンの超高速輸送現象の解明

Shuntaro Tani, Francois Blanchard, and Koichiro Tanaka "Ultrafast Carrier Dynamics Under High Electric Field in Graphene", Phys. Rev. Lett. 109, 166603 (2012). (原著論文 19)

被引用件数: 36 件(WEB OF SCIENCE)、54 件(Google Scholar)

概要: グラフェンは室温で銀に匹敵する伝導度を持ち、次世代ナノデバイスの基幹材料として脚光を浴びている。本成果では高電場下におけるグラフェン中の電子ダイナミクスをサブピコ秒の時間分解能で明らかにした。より長いパルス幅を用いた類似研究に比べ大気プラズマ光源を用いた高強度テラヘルツパルスを用いることで、キャリアが熱化する以前の超高速な輸送特性のミクロスコピックなメカニズムを明らかにすることに成功し、グラフェンのデバイス化に向けた基礎を固めた。

<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

1. テラヘルツデバイス評価に資するテラヘルツ顕微鏡の開発

概要: 高強度テラヘルツ発生技術とレーザー走査型顕微鏡製品をベースとした実用的な THz 近接場顕微鏡装置を開発した。波長の 100 分の1以下である 10 μ m の空間分解能をもち実時間で動作する顕微鏡は、電磁場シミュレーションに頼っていた近接場領域の電磁場応答を解析する新しいプラットフォームを提示した。メタマテリアル等の回折限界以下の微小デバイスの実評価から、世界初となる生細胞観察まで、様々なアプリケーションの可能性を示した。装置としてのコンセプトはほぼ完成しており、アプリケーション探索のステージに本技術を発展させた意義は大きい。

2. 金属構造体をベースとしたセンシング技術の先鋭化

概要: 金属構造体を用いることで、特定周波数のテラヘルツ電場や磁場を増強できることを明らかにした。この増強は、金属構造体周辺のテラヘルツ光の波長よりずっと小さい空間スケール

ルの「特別な場所」において生じていることから(近接場増強)、可視域の光をもちいたテラヘルツセンシングと組み合わせることにより、様々な周波数のテラヘルツ電場応答や磁場応答を空間的に切り分けて計測することが可能である。本 CREST 研究では、その原理を近接場顕微鏡や類似の計測技法を用いて明らかにし、金属構造体を用いたテラヘルツセンシング技術の先鋭化に寄与した。これにより、高速で多自由度の計測が可能となる新たなテラヘルツセンシングデバイスの道が拓かれる可能性がある。

3. フェムト秒レーザーをベースとした高強度テラヘルツ発生装置の開発

概要: 高強度フェムト秒パルスレーザーとパルス波面傾斜技術を駆使して、 LiNbO_3 結晶の光整流過程による高強度テラヘルツ光発生装置の構築に成功した。光学系の最適化をおこなうことによって、 1 MV/cm の電場振幅を超える、世界最高強度のテラヘルツパルス光源の開発に初めて成功した。その集光強度は他のグループが開発した光源に比べて数十倍という強さに達し、国内外の多くの研究者によって同手法が採用されるなど、この分野で世界的なインパクトを与えた。

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

①「京都大学」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
田中 耕一郎	京都大学大学院理学研究科	教授	H.21.10 ~
廣理 英基	京都大学物質－細胞統合システム拠点	特定拠点 准教授	H.21.10 ~
有川 敬	京都大学大学院理学研究科	助教	H.25. 4 ~
田中智子	京都大学物質－細胞統合システム拠点	研究員	H.22. 1 ~
玉谷 知裕	京都大学大学院理学研究科	研究補助員	H.26. 4 ~
Christian Wolpert	京都大学物質－細胞統合システム拠点	研究員	H.25. 4 ~
谷 峻太郎	京都大学物質－細胞統合システム拠点	研究員	H.21.10 ~
雙木 満	オリンパス株式会社 治療技術開発部	課長	H21.10 ~ H26.3
土井 厚志	オリンパス株式会社 光学技術部	課長代理	H21.10 ~ H26.3
養輪陽介	京都大学物質－細胞統合システム拠点	研究員	H22.4 ~ H23.3
Francois Blanchard	京都大学物質－細胞統合システム拠点	特定研究員	H21.10 ~ H24.9
青木 隆朗	京都大学大学院理学研究科	特定准教授	H21.10 ~ H23.3
白井 正伸	京都大学物質－細胞統合システム拠点	特定助教	H21.10 ~ H24.3
Nicolas Moisan	京都大学物質－細胞統合システム拠点	特定研究員	H21.10 ~ H22.10

永井 正也	京都大学大学院理学研究科	助教	H21.10 ～ H22.11
-------	--------------	----	-----------------

研究項目

- ・ 波長可変高強度テラヘルツ光源開発
- ・ 半導体量子構造における非線形分光
- ・ リアルタイムテラヘルツ近接場顕微鏡の開拓と応用

②「広島大学」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
角屋 豊	広島大学大学院先端物質科学研究科	教授	H21.10 ～
北川 二郎	広島大学大学院先端物質科学研究科	助教	H21.10～H24.3
富永 依里子	広島大学大学院先端物質科学研究科	助教	H24.8 ～
田口 玄	広島大学大学院先端物質科学研究科	研究員	H22.4～H23.3
Damien Armand	広島大学大学院先端物質科学研究科	研究員	H22.6 ～

研究項目

- ・ 半導体量子構造における非線形分光とテラヘルツスイッチ
- ・ テラヘルツ非線形性発現に適した半導体量子メタ構造

③「早稲田大学」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
青木 隆朗	早稲田大学理工学術院	教授	H.23.4 ～
養輪 陽介	大阪大学大学院基礎工学研究科	助教	H.23.4 ～

研究項目

- ・ 波長可変高強度テラヘルツ光源開発
- ・ 微小共振器－量子ドット結合系のテラヘルツ精密分光とコヒーレント制御

(2)国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

高強度シングルサイクルテラヘルツ光源をもちいた非線形光学研究に関しては、東京大学、大阪大学、MIT(米)、レーゲンスブルグ大学(独)、コンスタンツ大学(独)、Max-Planck 研究所(独)などと情報交換や共同研究を活発に推進した。このネットワーク形成の成果として、Nature Photonics 誌に共同で書いた Review Paper(原著論文 22)がある。テラヘルツ顕微鏡に関しては、オリンパス(株)やアイシン精機(株)と共同研究を進めるとともに、同じ CREST 領域の研究者と共同研究を進めた。

§3 研究実施内容及び成果

I. 「京都大学」グループ

1 波長可変高強度テラヘルツ光源開発

①研究のねらい

現在のシングルサイクル高強度テラヘルツ光発生技術を発展させ、共鳴効果を測定可能な、高強度波長可変テラヘルツ光源(帯域:0.5-2.5 THz, スペクトル幅 100 GHz 以下, ピーク電場強度: 100kV/cm)を開発する。摂動論ではとりあつかうことが不可能な領域の非線形分光、テラヘルツ近接場顕微鏡への適用を目指す。

②研究実施方法

新奇な非線形光学現象の発現が期待される、シングルサイクル高強度テラヘルツ光の最適化を追加項目として優先し、波長可変化を2年間繰り下げる計画変更をおこなった。シングルサイクル高強度テラヘルツ光の光源開発は京都大学グループがおこない、波長可変光源開発は京都大学グループと早稲田大学グループの共同研究ですすめた。

③研究成果

(1)シングルサイクルテラヘルツ光発生

高強度フェムト秒パルスレーザーとパルス波面傾斜技術を駆使して、 LiNbO_3 結晶の光整流過程による高強度テラヘルツ光発生装置を構築した。図1左のように発生光学系にイメージ光学系を用い、発生後の集光系に3つの放物面鏡をもちいることで、世界で初めて中心周波数 1THz で 1.2 MV/cm 以上の電場強度の発生に成功した。(原著論文 6) 図1右に得られたテラヘルツ光の時間波形を示す。これは計画当初に比べて、4 倍の電場増強、16 倍の出力増

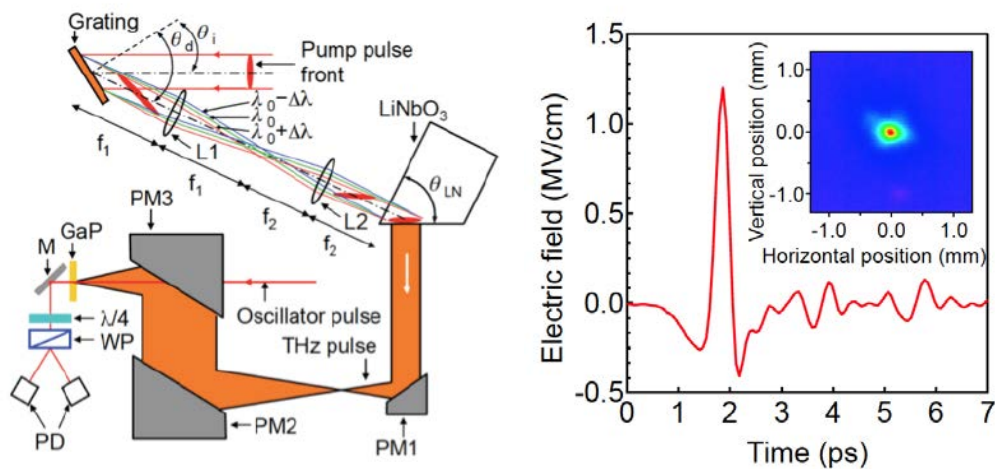


図1: 高強度テラヘルツ波の発生・検出の実験系の模式図(左側)。1MV/cm 強のピーク電場を持つ THz パルスの時間波形(右側)。挿入図は THz パルスのスポット画像。

強である。成功の最大の要因は、イメージ光学系により LiNbO_3 結晶内において入射する近赤外光パルス面とこれを傾けるための回折格子のイメージ面の角度を一致させた点である。また、図1右の挿入図にあるようにテラヘルツマイクロボロメーターカメラ(NEC 製)により、テラヘルツ波の集光の様子を実際にモニターすることにより最適解を得た。これにより高効率かつ大口径のテラヘルツの発生に成功した。これはテラヘルツマイクロボロメーターカメラの最初の実用的なデモンストレーションとなった。

(2) 空気プラズマをもちいた高強度テラヘルツ光源

空気に高強度レーザーを集光して、高強度テラヘルツ波を発生させる方法を検討した。特に、基本波と倍波の相対位相関係および相対偏光角を制御することで、空気プラズマから発生す

る 1-10 THz の低周波成分と 30-50 THz の高周波成分の強度と偏光を制御できることを見いだした(図 2(a))。低周波成分を最大化した場合、ピーク電場強度は約 300kV/cm、パルス幅は 200fs であり、Graphene の THz 非線形光学実験に応用した(図2(b)、原著論文 19)。

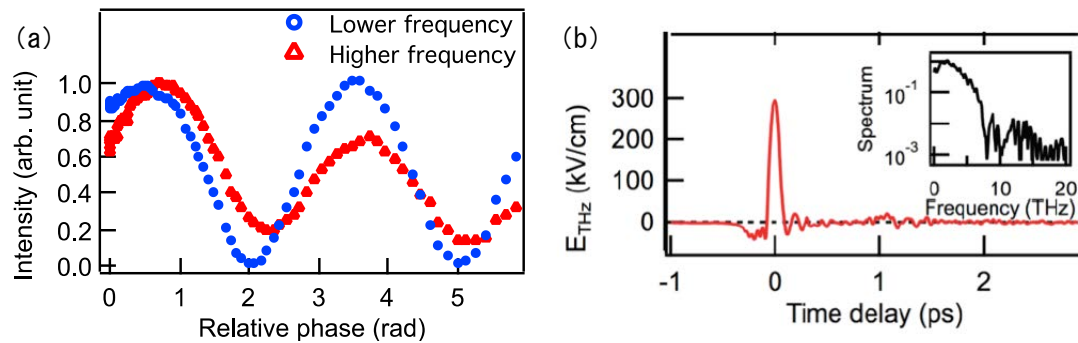


図 2: (a) プラズマ生成に用いているフェムト秒パルスの基本波と 2 倍波の相対位相に対する 1-10 THz の低周波成分強度と 30-50 THz の高周波成分強度の変化。(b) 電気光学サンプリングによって得られた空気プラズマによって発生したテラヘルツ光の電場波形。

(3) 波長可変高強度テラヘルツ光源開発
当初の予定から2年繰り下げて、早稲田大学グループと共同で研究開発をおこなった。原理検証実験(早稲田大学の項を参照)ののち、当該技術を1-(1)で述べた高強度フェムト秒パルスレーザーとパルス波面傾斜技術、LiNbO₃結晶の光整流過程による高強度テラヘルツ光発生と組み合わせることにより高強度化した。その結果、図3のように0.5 THz – 2.0 THz の間で波長可変であり 50GHz 以下の線幅と、10 kV/cm 以上の最大電場強度を有する光源の構築に成功した。この光源を用いて、半導体における非線形光学実験をおこなった。

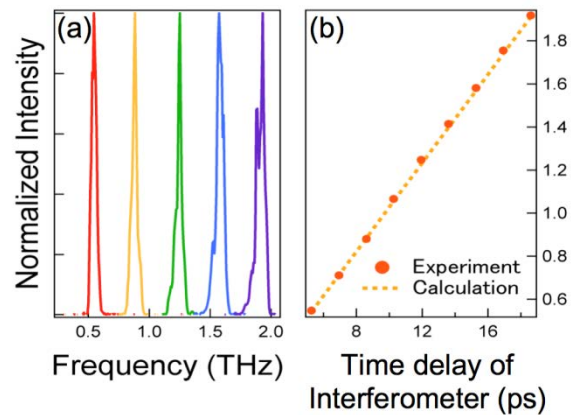


図 3: (a) 狭帯域テラヘルツパルスのパワースペクトル。(b) テラヘルツ周波数のマイケルソン干渉計における時間間隔依存性。

(まとめ)

計画変更はあったものの、レーザーのパルス波形整形技術をもちいて波長可変高強度テラヘルツ光源を構築した。シングルサイクル高強度テラヘルツ光源開発においては、1THz 帯のテラヘルツ光として世界最高の電場強度を達成した。これらにより、テラヘルツ非線形分光の研究が加速された。

2 半導体量子構造における非線形分光

① 研究のねらい

テラヘルツ領域における非線形光学応答は可視光領域とは極めて異なる状況にあることが予想される。可視域では破壊が起きるために不可能であった固体における非摂動論的非線形光学の実験をテラヘルツ領域では破壊閾値以下の光強度で行うことが可能である。固体における非摂動論的非線形光学はまったく未知の領域であり、物性物理学に新たな展開を導く可能性が高い。本研究では、半導体量子構造における高密度電子-正孔(励起子)系やサブバンド構造に着目し、テラヘルツ領域の非線形分光技術を確立するとともに、非摂動論的非線

形光学応答の問題に正面から取り組む。

②研究実施方法

研究項目1で開発した高強度テラヘルツ光源をもちいて、非線形光学の実験をおこなう。巨大な非線形効果が期待される、半導体における不純物キャリア系、強誘電体のソフトモードフォノン、量子井戸構造の励起子系、グラフェンなどの低次元伝導体において研究を進めた。量子井戸試料は広島大学と東京大学との共同研究により準備した。また、金属構造体による局所電磁場増強の研究もおこなった。

③研究成果

(1) 半導体における不純物キャリア系のイオン化（原著論文 24）

Ga をドーピングした Ge において高強度テラヘルツ光を照射することによって、アクセプターに束縛されたホールがイオン化し、自由なキャリアとして振る舞うことが観測された。図4は、5 K においてシングルサイクルの高強度テラヘルツ光を照射した後、200 ピコ秒に十分に弱いテラヘルツ光をもちいて観測した Ge のテラヘルツ領域の伝導度(a)と誘電率(b)である。高強度テラヘルツ波の電場強度が弱い場合は、アクセプターに束縛されたホールの束縛準位間遷移のスペクトルが得られるが、電場強度が強い場合は、ドルーデ型の誘電応答が得られることがわかった。これは、5 KV/cm 以上の電場強度をもつテラヘルツ光照射により、アクセプターがイオン化したことを表す。DC 電場のトンネリオン化理論から予想されるトンネリオン化閾値が 5 KV/cm であることから、1 ピコ秒以下のパルス幅のテラヘルツ光によってトンネリオン化が誘起されたものと考えられる。

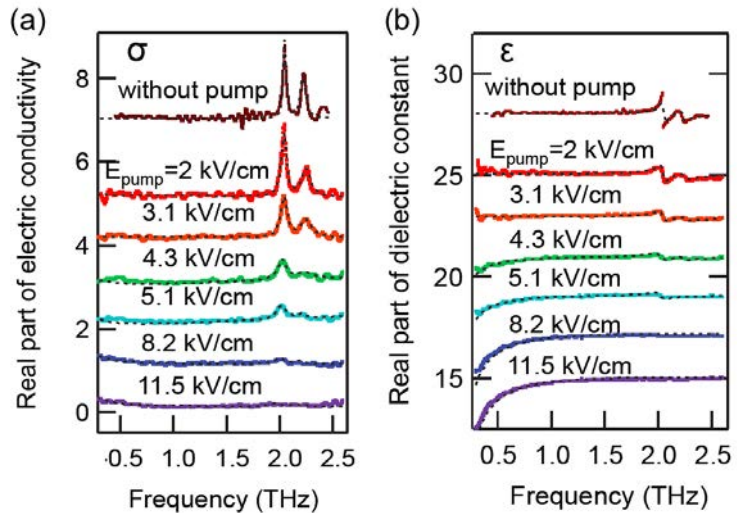


図 4: テラヘルツパルス励起後の Ga ドープ Ge 試料の誘電率スペクトル。

(2) 強誘電体のソフトモードフォノンの非調和性（原著論文 13）

BaTiO₃ に代表される強誘電性ペロブスカイト結晶はソフト光学フォノンモード (TO フォノンモード) を有し、その振動数は温度の低下とともに 0 にむかって減少する。振動数の減少は静的誘電率の増大を招き、ある温度で強誘電相転移が誘起されることとなる。このような温度変化は、もともとの TO フォノンモードが鍋底型の非調和ポテンシャルを有していることから説明される。本研究では、量子常誘電体として知られソフトモードを有するチタン酸ストロンチウム (SrTiO₃) の薄膜結晶に高強度テラヘルツ電場を照射し、その応答を調べることでポテンシャルの非調和性を明らかにした。薄膜結晶を透過した電場波形をフーリエ変換し、それを印加したテラヘルツ電場波形で割り算して得られた有効感受率の実部と虚部を図 5 に示す (E_0 は 80 KV/cm)。明らかに、印加電場強度の増大とともに振幅数が高周波側にシフトしていることがわかる。これは高強度のテラヘルツ電場印可により大振幅の運動が誘起され、それにより運動の振動数が高くなったことをあらわしている。最大電場強度におけるソフトモードの振幅は強誘電転移に必要な原子変位の 10 分の 1 程度と見積もられている。今後、更なるテラヘルツ電場強度の増大により、相転移を誘起することも可能になると考えられる。

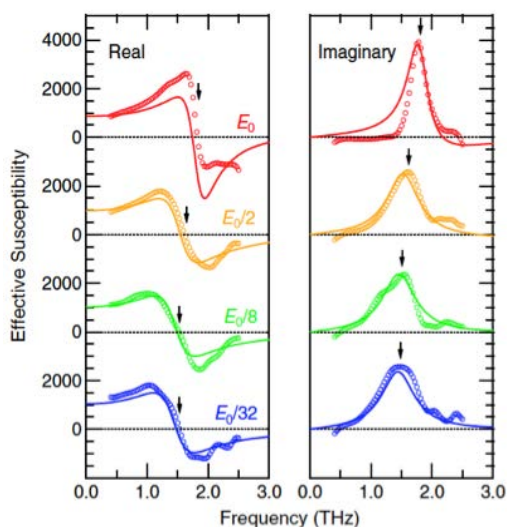


図 5: テラヘルツパルス励起後のチタン酸ストロンチウム (SrTiO_3) 試料の誘電率スペクトル。

(3) GaAs 量子井戸における巨大キャリア増幅 (原著論文 9)

本研究では、1 MV/cm 程度のピーク電場値をもつテラヘルツ光パルスを GaAs/ $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 多重量子井戸に照射し、励起子発光 (1.55eV) の観測に成功した。スペクトル形状が可視光励起の場合のスペクトルとほとんど一致していることから、バンドギャップの 380 分の 1 の光子エネルギーしかも

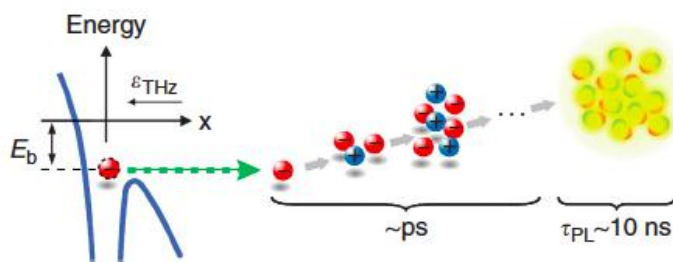


図 6: テラヘルツパルス励起により GaAs 量子井戸中の不純物準位がイオン化し、放出された電子が衝突イオン化により増幅し、発光する様子の模式図。

たないテラヘルツ光パルス照射によって、励起子発光が生じたことを示している。励起子発光は 0.45 MV/cm の電場強度以上で急激に出現し、それより高電場では電場強度の 8 乗で増加することがわかった。発光強度は残留キャリア密度に比べると遥かに大きいことから、テラヘルツ光照射により1000倍もののキャリア増幅が起きていることが示唆される。これは、図 6 に示すように残留キャリアの加速、インパクトイオン化などが1ps 以内の短時間に複合的に起きていることを意味している。実際、インパクトイオン化による簡単なモデル計算からこの結果を再現することに成功した。この結果は、テラヘルツ光により約 380 倍ものエネルギーのバンド間遷移を起こす世界初の発見であり、テラヘルツ非線形分光だけでなく、半導体デバイス物理に与えるインパクトは大きい。

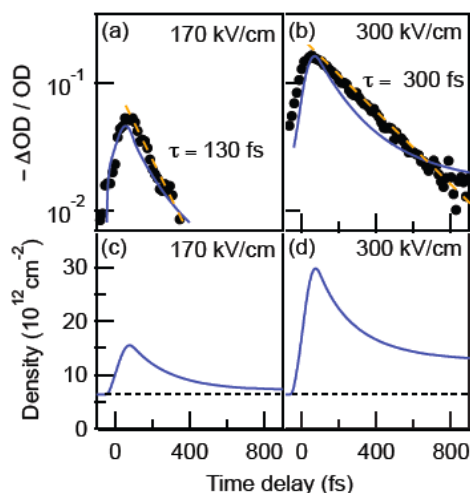


図7: 照射テラヘルツ強度を変えた場合の近赤外吸収飽和の時間減衰。上段は実験、下段は理論。

(4) グラフェンにおけるテラヘルツ誘起巨大透明化現象（原著論文 19）

大気プラズマを用いたテラヘルツ高強度テラヘルツポンプ近赤外プローブの実験系を構築し、テラヘルツ光照射によるグラフェンの近赤外領域での 16%にもおよぶ吸収飽和を観測した。図 7 に示すように、この吸収飽和は1ピコ秒以内に回復することがわかった。テラヘルツ光の光子エネルギーは近赤外光の 100 分の 1 程度であることから、この吸収飽和はテラヘルツ光により作られた極めて非摂動論的な状態を反映しているものと考えられる。このキャリアダイナミクスを定量的に理解するため、ボルツマン方程式を用いたシミュレーションを行うことにより実験結果を定性的に再現した。その結果、もともとのキャリア数の5倍以上の電子-正孔対がインパクトイオン化によって生成されることが結論された。これは、テラヘルツ領域の光による高速可視光スイッチの構築の新しい可能性を示している。

(5) 金属構造体による局所テラヘルツ電磁場増強の直接的観測

電場増強によるさらなる非線形性の発現にむけて、狭ギャップダイポールアンテナによる電場増強を明らかにした。まずオリンパス・京都大学グループで開発されたテラヘルツ波顕微鏡を用いて計測を行ったが、検出に用いる電気光学結晶基板の影響により、2倍程度の増強度となっていたため、半導体薄膜のみを用いた素子を作製し、励起子フランチケルディッシュ効果を用いた観測を行った。この結果図 8 に示すように、局所的かつ直接的な観測において 40 倍の増強を実証した。また、さらに共振周波数や増強度を高める方策を考案した。

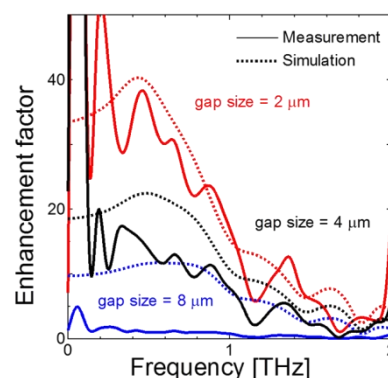


図8: 狭ギャップダイポールアンテナによるテラヘルツ電場増強。

以下の(6),(7)の研究成果は基本的にこのコンセプトを発展させたものである。

(まとめ)

シングルサイクル高強度テラヘルツ光をもちいて様々な非線形光学効果を観測した。これらの結果は、新たなキャリア伝導の物理や光スイッチに発展することが確実である。また、テラヘルツ電磁場増強の手段として金属構造体が有用であることを明らかにした。さらに、波長可変テラヘルツ光源をもちいた半導体の非線形光学応答の観測にも成功した。

3 リアルタイムテラヘルツ近接場顕微鏡の開拓と応用

① 研究のねらい

高強度テラヘルツ光により、波長の 100 分の 1 以下の分解能を有しビデオレートで動作する近接場顕微鏡を構築する。これにより、線形・非線形光学応答が近接場の領域で可視化される。一般に、近接場顕微鏡の感度は低く画像取得に時間がかかるが、高強度テラヘルツ光の特性を最大限に活用することにより、高感度・高分解能・高速データ取得が可能となる。光学系の最適化や既存の共焦点顕微鏡との融合をすすめることにより、波長以下の大きさの固体結晶の線形・非線形光学応答を時空間で解析可能な究極的な実験系が構築できる。また、このテラヘルツ近接場顕微鏡は生理環境下での生体分子や細胞の新しい可視化技術を提供する。生体高分子などに感度があるテラヘルツ波のセンシング能力を細胞観察にまで拡張するべく、テラヘルツ近接場顕微鏡の応用開発を行い、実際に生細胞などの試料測定を行うことでその効果を確認する。

②研究実施方法

京都大学とオリンパスが共同で検討を行い、京都大学内にテラヘルツ近接場顕微鏡装置を構築した。また、その装置を用いた試料測定も共同で行った。

③研究成果

- (1)リアルタイム観察が可能なテラヘルツ近接場顕微鏡を構築し、 $\lambda/150$ の空間分解能を達成 (原著論文 2, 8, 11, 30)

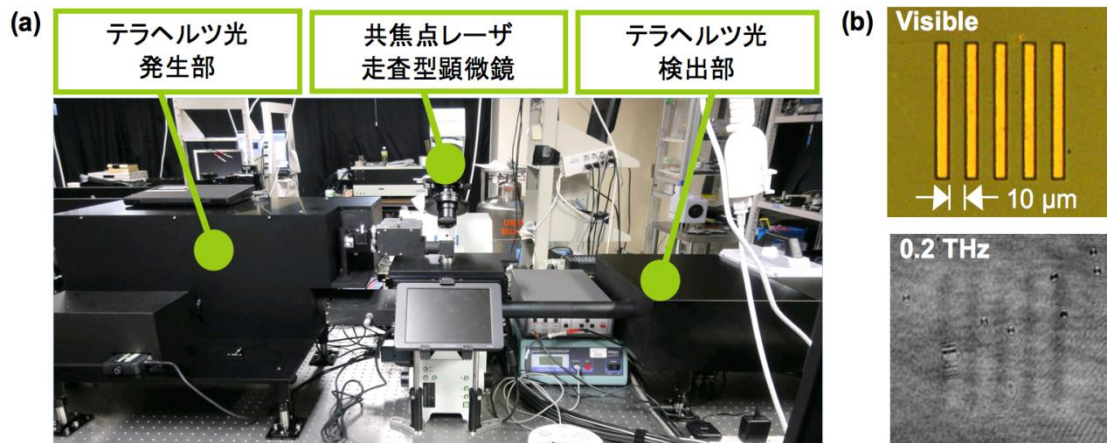


図 13: テラヘルツ近接場顕微鏡 (a)全体写真、(b) 空間分解能評価画像

回折限界以下の空間分解能を有し、ビデオレートでの動作が可能なテラヘルツ近接場顕微鏡の開発を行った。近接場検出手法を確立し、共焦点レーザー走査型顕微鏡を活用した構成とすることで、実用に近いレベルの顕微鏡システムの構築に成功した(図 13(a))。また、図 13(b)は線幅と間隔が 10 μm の金属ライン構造を可視光とテラヘルツ光で観察した結果であるが、1.5 mm の波長(周波数 0.2 THz)のテラヘルツ光でもその構造を十分に観測できており、波長(λ)の 150 分の 1 以下の空間分解能を実現した。また、高速 CMOS カメラを利用することで最大 80 fps で画像検出も可能となった。これらの成果は論文として公表するとともに特許出願をおこなった。

- (2)メタマテリアル材料の二次元電場応答を実測評価 (原著論文 18)

テラヘルツ近接場顕微鏡を用いることで、これまでシミュレーションでしか検証できなかったメタマテリアル材料における電場の時空間発展を実測で詳細に評価した。図 14 は単一スプリットリング共振器(SRR)の実測分光画像と、FDTD 計算画像である(下記リンクにて、実測による電場時間発展の動画を閲覧可能)。両者は非常に近い結果を示しており、また、共振器ギャップ部分(幅 4 μm)でのテラヘルツ光増幅が明瞭に観測されている。この検討により、テラヘルツ近接場顕微鏡がこのような光機能性材料の評価に非常に有用であることを示した。

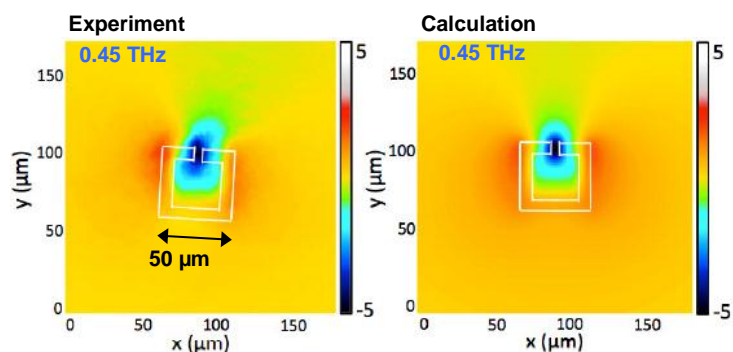


図 14: スプリットリング共振器(SRR)のテラヘルツ光。左: 実験で得られた 0.45THz 成分のテラヘルツ電場振幅画像、右: FDTD 計算で得られた同じ周波数成分の電場振幅画像

(3) テラヘルツ顕微鏡によるテラヘルツデバイスの評価 (原著論文 26)

広島大学で作製したテラヘルツ光用ホーンアンテナの特性を、テラヘルツ近接場顕微鏡を用いて評価した。テラヘルツ近接場顕微鏡で得た画像を周波数解析した結果、アンテナの遠方界での測定結果と対応する周波数がアンテナ出口での近接場でのテラヘルツ電波成分として集中しており、アンテナがない場合と比較して約 4 倍の電場の増強がみられた。又、この測定によりアンテナを構成する 2 つのブロックの接続部分でのテラヘルツ波のしみ出しがあることが確認された。

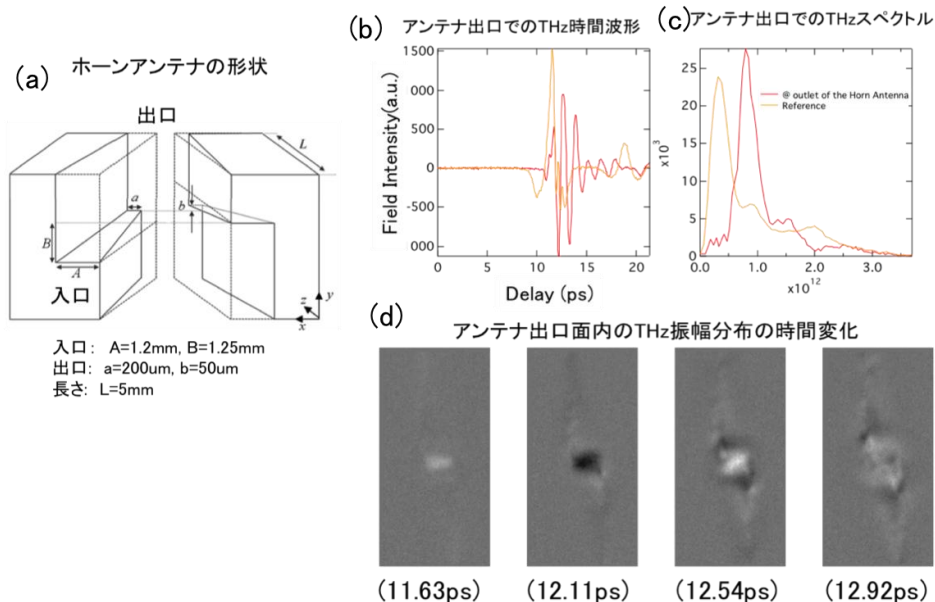


図 15: (a)作製したホーンアンテナの形状、(b)アンテナ出口での THz 時間波形とアンテナがないときの THz 時間波形、(c) アンテナ出口での THz スペクトルとアンテナがないときの THz スペクトル、(d)アンテナ出口での THz 画像。

(4) 多孔性ポリマー (Porous Coordination Polymer, PCP) におけるガス吸着過程のイメージング分析 (原著論文 35)

多孔性ポリマー (Porous Coordination Polymer, PCP) は図16(b)に示すようにナノサイズの細孔を有している結晶であり、液体にせまる密度でのガス吸着と保持が可能な材料である。本研究では、図16(a)に示したようなリング型の共振器構造をもちいて、ガスの吸着過程をテ

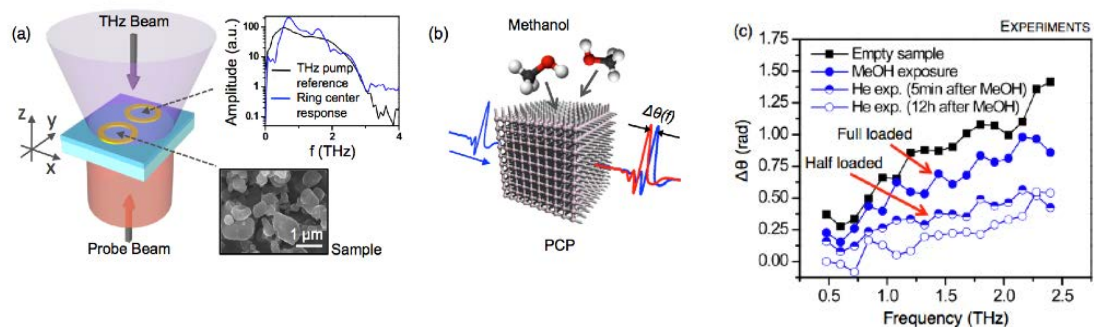


図 16: (a)作製リング型金属構造体センサーの概念図とテラヘルツ光のパワースペクトル、サンプルの形状。(b)PCP 結晶へのメタノールガス吸着の概念図、(c) メタノール吸着過程におけるテラヘルツ位相スペクトルの変化、

ラヘルツ近接場顕微鏡によってリアルタイムで分析した。リング共振器をペアで準備し、PCP を片側の共振器にだけセットすることにより、参照信号と PCP による応答を同時測定した。実験では、PCP として $\text{Cu}_3(\text{btc})_2$ を使い、メタノールの吸着過程を測定した。図16(c)に示すよう

に、テラヘルツ光応答の位相差として、メタノール量を定量評価することが可能であることがわかった。この結果は、テラヘルツ近接場顕微鏡をデバイスリーダーとして用いた典型的な例であり、少量の対象物に対しても高感度にテラヘルツ領域の光学応答を計測し、それをもちいたセンシングが可能であることを示している。

(まとめ)

計画通り、空間分解能が波長の $1/100$ 以下、実時間動作という、世界で唯一無二のテラヘルツ近接場顕微鏡の構築に成功した。顕微鏡の応用研究も順調にすすみ、メタマテリアルや金属構造体におけるテラヘルツ電磁場解析、生細胞などのイメージの取得に成功した。特に、生細胞の観察は世界初の結果であり、今後の顕微鏡の応用研究の突破口となることが期待される。

II. 「広島大学」グループ

1 半導体量子構造における非線形分光

①研究のねらい

京都大学グループの高強度テラヘルツ波による半導体量子構造の非線形分光を行うための試料を設計・作製する。また金属パターンを用いてテラヘルツ波を増強させる方法を探索する。

②研究実施方法

GaAs/AlGaAs 系半導体量子構造や2次元電子構造を分子線エピタキシー法により成長した。必要に応じて結晶成長層のみをエピタキシャルリフトオフ法で不要な基板から剥離し、Van der Waals 法によりサファイアまたは GaP 基板上ボンディングした。これらの試料に対し、京都大学グループでテラヘルツ波非線形分光実験が実施された。また半導体量子構造上にフォトリソグラフィによりダイポールアンテナ型の Au パターンを作製し、励起子フランチケルディッシュ効果を用いて、ギャップ部でのテラヘルツ波電界増強を調べた。

③研究成果

京都大学グループの項に記載（研究成果2-(3)、2-(5)、2-(9)）。

2 テラヘルツ非線形性発現に適した半導体量子メタ構造

①研究のねらい

テラヘルツフォトニックバンド構造、メタル伝送線路、半導体量子構造を統合した半導体量子メタ構造を作製し、巨大な非線形光学効果を発現させることを目的とする。メタルと誘電体フォトニック結晶からなるテラヘルツ導波路キャビティ中に半導体量子井戸を埋め込んだメタデバイスを開発するとともに、テラヘルツ波を素子外部から効率よく結合するためのカップラーおよび導波路内でテラヘルツを発生するための機構を開発する。最終的には、再生増幅を使用しない程度の励起パルス光でテラヘルツ非線形を発現させることを目指す。テラヘルツ波非線形応答を様々な応用するためには、デバイス化が重要である。特にテラヘルツ波が3次元的に閉じ込められたキャビティを用いることで効率化が図れ、パルス光源に再生増幅器が不要となって、波及効果が大きくなることが期待される。

②研究実施方法

研究期間の前半では、当初計画に沿ってプラズマエッチングによって作製した Si パターンを Au で覆った金属 2 次元フォトニック結晶と金属平板からなる導波路・共振器を実現した。またこのデバイスにテラヘルツ波を入射するための高効率ホーンアンテナを設計・作製し、フォトニック結晶導波路のテラヘルツ波伝搬を確認することに成功したが、この方法では低温測定時のアライメントが極めて困難であることが判明した。このため、H25 年度から方針を変更し、カップラー一体型テラヘルツ波共振器の実現に取り組んだ。テラヘルツ波集光と軸方向電場発生を同時に可能にする非対称ブルズアイ構造を考案し、実証した。分子線エピタキシー結晶成長法により作製した半導体量子井戸構造を含む金属・半導体・金属構造を、エピタキシャルリフトオフおよびボンディングにより作製し、この中に可視プローブが可能な透明電極電極

(ITO)からなる共振器を配置した。これらデバイスの評価には、広島大学内のテラヘルツ分光系、および京都大学グループで開発された、近接場顕微鏡を含む高強度テラヘルツ波光源を用いた。

③研究成果

(1) フォトニック結晶・導波路・共振器 (原著論文 16,17)

数値シミュレーションに基づき種々の構成を検討した結果、フォトニック結晶としては図20(a),(b)に示すような正方格子金属ロッドからなる2次元結晶を金属平板で挟み込んだ構成とした。このデバイスにおいて、図20(c),(d)に示すように、フォトニックバンドが生成されることを確認し、ロッドと金属平板の間のギャップを変化させることで、バンド構造を制御できることを見出した。

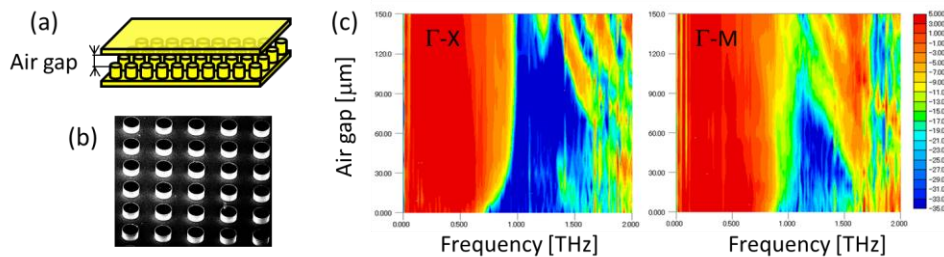


図20: フォトニック結晶。(a)概念図、(b)パターン部の顕微鏡写真、(c) Γ -X および Γ -M 方向の透過スペクトルのエアギャップ依存性。

(2) テラヘルツ波ホーンアンテナ (原著論文 26)

導波路へのテラヘルツ波カップラーとして、図21(a)に示すホーンアンテナを設計・試作した。ホーンアンテナペア(集光・取り出し)の入出力特性を図21(b)に示す。カットオフ周波数は設計通りの750GHzであり、1 THz~1.7THzの間で、透過率がほぼ 100%の良好な伝送特性を確認した。出射部の面積が $0.2 \times 0.05 \text{ mm}^2$ と小さく、電界強度を高めることができる。京都大学グループの近接場顕微鏡を用いた評価により、ホーンアンテナがない場合と比較して約4倍の電場の増強がみられた。

また、このカップラーを用いて図21(c)に示すフォトニック結晶導波路の明瞭なテラヘルツ波伝送を確認した(図21(d))。しかしながら、ホーンアンテナと導波路デバイスのアライメントは 0.01mm 以下の精度で行う必要があり、クライオスタットを用いた低温測定では実現が極めて困難であることが明らかになったため、以下のカップラー・共振器一体型デバイスを開発することとした。

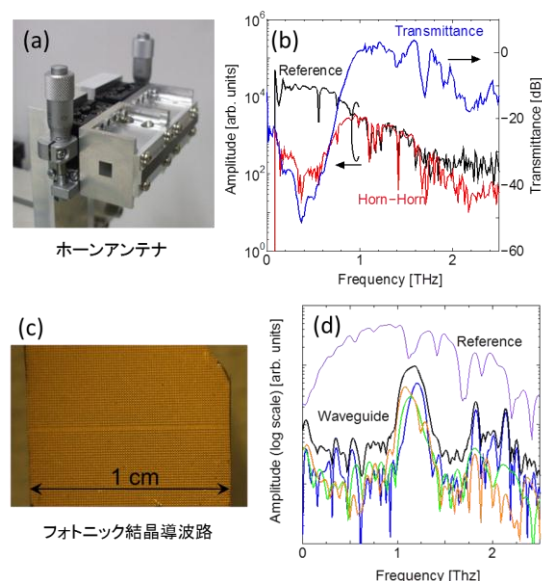


図21: (a)ホーンアンテナ写真、(b)ホーンアンテナ伝送スペクトル、(c)フォトニック結晶導波路写真、(d)導波路伝送スペクトル。

(3) 非対称ブルズアイカップラー一体型テラヘルツ波共振器

量子井戸サブバンド間遷移に起因するテラヘルツ波非線形現象を実現するには、量子井戸面と垂直な電場が必要であるが、一般的なブルズアイ型カップラーでは試料表面に垂直入射

する波に対して光軸方向（量子井戸と垂直）な電界成分が得られない。本研究では、集光と光軸方向成分発生機能を併せ持つ非対称ブルズアイ構造を考案・作製し（図22(a)）、図22(b)に示すように、京都大学グループの近接場顕微鏡を用いてテラヘルツ波の波集光・軸方向電場発生を実証した。また、量子井戸構造を含む共振器を一体化したデバイス（図22(c)）を作製し、京都大学グループの高強度テラヘルツ波光源を用いて非線形現象観測実験を進めている。シミュレーションにより、図22(d)に示すように、ブルズアイ中心入射波の面内電界方向を軸方向に変換して、かつ5倍の電場が発生できること、共振器内においては30倍となることを確認した。

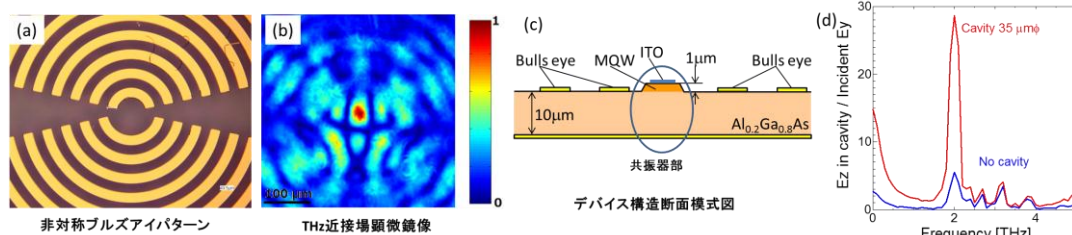


図22:(a)非対称ブルズアイパターン、(b)軸方向電場の近接場顕微鏡写真、(c)ブルズアイ・共振器一体型デバイス概念図、(d)共振器中心での電界スペクトル。

(まとめ)

テラヘルツ波フォトニック結晶導波路、高効率ホーンアンテナカプラーの実現に成功した。またテラヘルツ波を集光し、かつ軸方向電場を発生できる非対称ブルズアイカプラーを考案、実証した。共振器との組み合わせにより 30 倍の電場増強を予測した。さらに計画に加えて、傾斜位相グレーティングによる方向性カプラーを考案した。

Ⅲ.「早稲田大学」グループ

1. 波長可変高強度テラヘルツ光源開発

①研究のねらい

シングルサイクル広帯域高強度テラヘルツ光源と相補的な光源として、波長可変狭帯域テラヘルツ光源を開発する。この光源には、以下の特徴が求められる。

- (1) 中心周波数が可変であること
- (2) パルス長が可変であること
- (3) 周波数幅が可変であること
- (4) チャープ量が可変であること
- (5) 京都大学グループの高強度テラヘルツ波発生技術に適用できること

これらを実現するため、チャープ光パルスをマイケルソン干渉計により干渉させる「チャープ光パルス干渉法」に着目した。本手法は上記の(1)(2)(5)を満たしている。本研究では、これまで未解明であったチャープ制御理論を確立し、これを実験的に実証することで(3)(4)を達成し、(1)～(5)をすべて満たす波長可変狭帯域テラヘルツ光源を開発する。さらに、開発した技術を京都大学グループに移転し、同グループの高強度テラヘルツ波発生技術に適用することで、波長可変狭帯域高強度テラヘルツ光源を構築し、非摂動論領域のテラヘルツ非線形実験を展開する。

②研究実施方法

早稲田大学グループにおいてチャープ制御理論を確立し、さらに実証実験を実施する。開発

した技術を京都大学グループに移転し、同グループの高強度テラヘルツ波発生技術に適用する。

③研究成果

(1) 狭帯域テラヘルツパルスのチャープ制御理論の確立（原著論文 29）

チャープ光パルス干渉法におけるテラヘルツパルスのチャープ制御理論を確立した。特に、パルス拡張器のスペクトル位相とテラヘルツパルスのチャープの関係を定式化した。すなわち、入力レーザーパルスを中心周波数 ω_0 、時間幅を Δ のガウシアンパルスとし、パルス拡張器のスペクトル位相 Φ をレーザーパルスの中心周波数で

$$\Phi(\omega) = \Phi^{(1)}(\omega - \omega_0) + \Phi^{(2)}(\omega - \omega_0)^2 + \Phi^{(3)}(\omega - \omega_0)^3$$

と展開し、マイケルソン干渉計の時間遅延を Δ としたとき、発生するテラヘルツパルスは線形にチャープしたがガウシアンパルスであり、その中心周波数 ω_T は

$$\omega_T = -1/(2\Phi^{(2)})$$

チャープの周波数掃引レートは
 $-3\Phi^{(3)}/(2\Phi^{(2)2})$

で与えられる。

さらに、回折格子をパルス拡張器として用いた実験において、本理論の妥当性を実証した。実験結果を図24に示す。

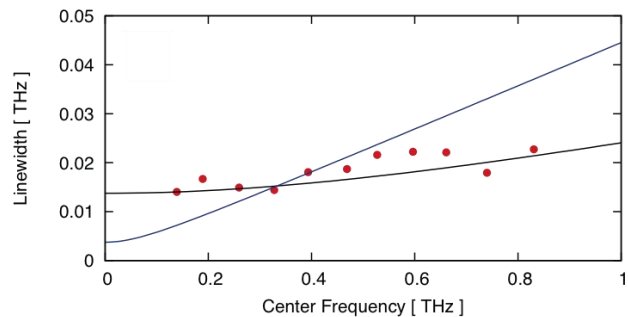


図24 回折格子をパルス拡張器として用いて発生させた狭帯域テラヘルツパルスの線幅と中心周波数の関係。赤丸が実験結果、黒線が理論、青線が先行研究に対応する結果。

(2) 光ファイバーを用いたフーリエ限界テラヘルツパルスの発生（原著論文 27,32）

上記(1)で確立した理論により、回折格子対を用いた場合には、テラヘルツ波のチャープ量に対して回折格子対のパラメータによらない下限が存在し、フーリエ限界パルスを得ることが原理的に不可能であることを明らかにした。さらに、分散が適切に制御された単一モード光ファイバーを光パルス拡張器に用いることで、フーリエ限界パルスを得ることが可能であることを理論的に示すとともに、市販の単一モード光ファイバーを用いた実験により、回折格子対の下限を超えてチャープの抑制されたテラヘルツ波の発生を実現した。実験結果を図25に示す。

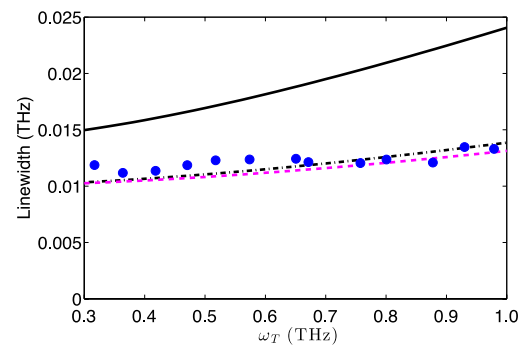


図25 単一モード光ファイバーをパルス拡張器として用いて発生させた狭帯域テラヘルツパルスの線幅と中心周波数の関係

(3) 強くチャープしたテラヘルツパルスの発生（原著論文 31,33）

光パルス拡張器として回折格子対を用いることで、回折格子対のパラメータを介してテラヘルツ波のチャープを自在に制御できることを理論的に示すとともに、チャープが自在に制御されたテラヘルツパルス発生を実験的に実現した。図26に実際に発生したテラヘルツパルスのスペクトログラムと、2つの時刻における短時間フーリエ変換スペクトルの例を示す。

(4) 2対の回折格子対を用いたフーリエ限界テラヘルツパルスの発生(原著論文 38)

内部レンズを有する回折格子対を用いることで正にチャープしたテラヘルツパルスが発生できることを理論と実験で示すとともに、これと内部レンズを有さない回折格子対とを組み合わせることで、テラヘルツパルスのチャープの原因となる3次のスペクトル位相を相殺し、フーリエ限界テラヘルツパルスの発生が可能であることを実験で実証した。

(まとめ)

チャープパルス干渉法による波長可変狭帯域テラヘルツ波発生法における狭帯域テラヘルツパルスのチャープ制御理論を構築し、実験により実証した。特に、光パルス拡張器として単一の回折格子対を用いた場合には、フーリエ限界パルスを得ることが原理的に不可能であること、分散が適切に制御された単一モード光ファイバーを用いることで、フーリエ限界パルスが得られることを理論的に示すとともに、実験により実証した。さらに、回折格子対を用いることで、回折格子対のパラメータを介してテラヘルツ波のチャープを自在に制御できることを理論的に示すとともに、チャープが自在に制御されたテラヘルツパルス発生を実験的に実現した。さらに、2対の回折格子対を用いることで、フーリエ限界パルスが得られることを理論的に示すとともに、実験により実証した。

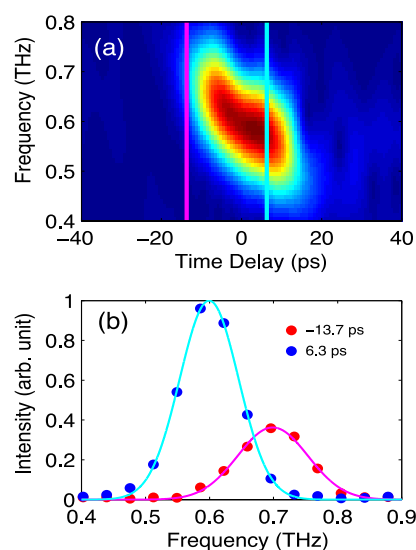


図26 (a) 負に強くチャープしたテラヘルツパルスのスペクトログラム (b) 時刻-13.7 ps, 6.3 ps における(a)の短時間フーリエ変換スペクトル

2. 微小共振器－量子ドット結合系のテラヘルツ精密分光とコヒーレント制御

①研究のねらい

可視～近赤外領域の高Q値微小共振器と単一量子ドットが結合した系を用いて、単一量子ドット内部状態の精密分光とコヒーレント制御を目指す。

②研究実施方法

可視～近赤外領域において高いQ値を持つトロイド型微小共振器、および高透過率を持つサブ波長径テーパファイバーを作製する。これらを用いることで、光領域での高効率集光を実現し、テラヘルツ光による量子ドットの発光過程の制御への応用を目指す。

③得られた成果

(1) 高 Q 値微小共振器・超低損失テーパファイバーの作製 (原著論文 5)

99%以上の透過率を持つサブ波長径のテーパファイバーと、 3×10^8 以上のQ値を持つトロイド型微小共振器を作製し、さらにクライオスタット内でのテーパファイバーと単一量子ドットの結合に成功した。この系はテーパファイバーの Purcell 効果により、高 NA 対物レンズを凌駕する効率で単一量子ドットの発光を単一モードファイバーへ集光することが可能である。

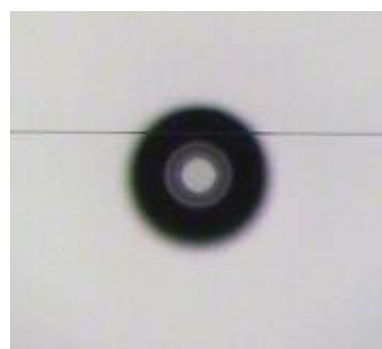


図27 作製したトロイド型微小共振器とテーパファイバーの光学顕微鏡写真

(2) 高強度テラヘルツ光による量子ドット発光明滅現象制御に向けた単一量子ドットの精密分光
(原著論文 21)

高強度テラヘルツ光による量子ドット発光明滅現象の制御に向けて、単一量子ドットの精密分光測定を行った。特に、単一量子ドットの発光明滅現象を観測し、その励起波長依存性を測定した結果、オン状態とオフ状態の持続時間が従う冪乗則の指数が励起の余剰エネルギーに依存することを見いだした。さらに、この発光明滅現象において、新奇な発光状態を見いだした。すなわち、高い励起光強度下 (92 W/cm^2) で測定した場合は、オン状態のおよそ半分の発光強度を有する中間状態が現れ、その発光のピークエネルギーはオン状態よりも 10 meV 程度低エネルギー側にシフトしていることが観測された。このシフト量はトリオンの束縛エネルギーと同程度であり、光学的励起によるトリオン形成を示唆している。

(まとめ)

高強度テラヘルツ光による量子ドットの内部量子状態や発光過程の制御に向けて、光領域での高効率集光のためのデバイスを作製した。さらに、高強度テラヘルツ光による量子ドット発光明滅現象の制御に向けて、単一量子ドットの精密分光測定を行い、発光明滅現象における新奇な発光状態を発見した。

§ 4 成果発表等

(1) 原著論文発表 (国際(欧文)誌 38 件)

1. H. Hirori, M. Nagai, and K. Tanaka, "Excitonic Interactions with Intense Terahertz Pulses in ZnSe/ZnMgSSe Multiple Quantum Wells", *Phys. Rev. B* 81, 081305(R) (2010). *Editor's suggestion.
2. A. Doi, F. Blanchard, H. Hirori, and K. Tanaka, "Near-field THz imaging of free induction decay from a tyrosine crystal", *Opt. Express*, 18, 18419 (2010).
3. M. Jewariya, M. Nagai, and K. Tanaka, "Ladder Climbing on the Anharmonic Intermolecular Potential in an Amino Acid Microcrystal via an Intense Monocycle Terahertz Pulse", *Phys. Rev. Lett.* 105, 203003 (2010).
4. K. Shinokita, H. Hirori, M. Nagai, N. Satoh, Y. Kadoya, and K. Tanaka, "Dynamical Franz-Keldysh effect in GaAs/AlGaAs multiple quantum wells induced by single-cycle terahertz pulses", *Appl. Phys. Lett.* 97, 211902 (2010).
5. Takao Aoki, "Fabrication of Ultralow-loss Tapered Optical Fibers and Microtoroidal Resonators", *Jpn. J. Appl. Phys.* 49, 118001 (2010).
6. H. Hirori, A. Doi, F. Blanchard, and K. Tanaka, "Single-cycle terahertz pulses with amplitudes exceeding 1 MV/cm generated by optical rectification in LiNbO₃", *Appl. Phys. Lett.* 98, 091106 (2011).
7. M. Hishida and K. Tanaka, "Long-range hydration effect of lipid membrane studied by terahertz time-domain spectroscopy", *Phys. Rev. Lett.* 106, 158102 (2011).
8. F. Blanchard, A. Doi, T. Tanaka, H. Hirori, H. Tanaka, Y. Kadoya, and K. Tanaka, "Real-time terahertz near-field microscope," *Opt. Express*, 19, 8277 (2011).
9. H. Hirori, K. Shinokita, M. Shirai, S. Tani, Y. Kadoya, K. Tanaka, "Extraordinary carrier multiplication gated by a picosecond electric field pulse", *Nature Communications*, 2, 594 (2011).
10. Koichiro Tanaka, Hideki Hirori, and Masaya Nagai, "THz Nonlinear Spectroscopy of Solids", *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 1, 301 (2011).
11. A. Doi, F. Blanchard, T. Tanaka, and K. Tanaka, "Improving spatial resolution of real-time terahertz near-field microscope", *Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves*, 32, 1043 (2011).
12. Yosuke Minowa, Masaya Nagai, Hu Tao, Kebin Fan, A. C. Strikwerda, Xin Zhang, Richard D. Averitt, and Koichiro Tanaka, "Extremely thin metamaterial as slab waveguide at terahertz frequencies", *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 1, 441 (2011).
13. I. Katayama, H. Aoki, J. Takeda, H. Shimosato, M. Ashida, R. Kinjo, I. Kawayama, M. Tonouchi, M. Nagai, and K. Tanaka "Ferroelectric soft mode in a SrTiO₃ thin film impulsively driven to the anharmonic regime using intense picosecond terahertz pulses", *Phys. Rev. Lett.* 108, 097401 (2012).
14. Damien Armand, Gen Taguchi, and Yutaka Kadoya "Mechanical active control of surface plasmon properties", *Opt. Express*, 20, 9523 (2012).
15. M. Hishida, K. Tanaka, "Transition of the hydration state of a surfactant accompanying structural transitions of self-assembled aggregates", *J. Phys.: Condens. Matter*, 24, 284113 (2012).
16. Jiro Kitagawa, Mitsuhiro Kodama, and Yutaka Kadoya "Design of Two-Dimensional Low-Dielectric Photonic Crystal and Its Terahertz Waveguide Application", *Jpn. J. Appl. Phys.* 51, 062201 (2012).
17. Jiro Kitagawa, Mitsuhiro Kodama, Shingo Koya, Yusaku Nishifuji Damien Armand and Yutaka Kadoya, "THz wave propagation in two-dimensional metallic photonic crystal with mechanically tunable photonic-bands", *Opt.*

- Express, 20, 17271 (2012).
18. F. Blanchard, K. Ooi, T. Tanaka, A. Doi, and K. Tanaka "Terahertz spectroscopy of the reactive and radiative near-field zones of split ring resonator", Optics Express, 20, 19395 (2012).
 19. Shuntaro Tani, Francois Blanchard, and Koichiro Tanaka "Ultrafast Carrier Dynamics Under High Electric Field in Graphene", Phys. Rev. Lett. 109, 166603 (2012).
 20. Yuji Hazama, Nobuko Naka, Makoto Kuwata-Gonokami, and Koichiro Tanaka, "Resonant creation of indirect excitons in diamond at the phonon-assisted absorption edge", Europhysics Letters, 104, 47012 (2013)
 21. N. Yoshikawa, H. Hirori, H. Watanabe, T. Aoki, T. Ihara, R. Kusuda, C. Wolpert, T. K. Fujiwara, A. Kusumi, Y. Kanemitsu, and K. Tanaka, "Biexciton state causes photoluminescence fluctuations in CdSe/ZnS core/shell quantum dots at high photoexcitation densities", Phys. Rev. B 88, 155440 (2013)
 22. Tobias Kampfrath, Koichiro Tanaka and Keith A. Nelson, "Resonant and nonresonant control over matter and light by intense terahertz transients", Nature Photonics 7,680 (2013).
 23. K. Shinokita, H. Hirori, K. Tanaka, T. Mochizuki, C. Kim, H. Akiyama, L. N. Pfeiffer and K. W. West, "Terahertz-Induced Optical Emission of Photoexcited Undoped GaAs Quantum Wells", Phys. Rev. Lett. 111, 067401 (2013). *Editor's Suggestion
 24. Y. Mukai, H. Hirori, and K. Tanaka, "Electric field ionization of gallium acceptors in germanium induced by single-cycle terahertz pulses", Phys. Rev. B 87, 201202(R) (2013).
 25. H. Nishimura, K. Ritchie, R. S. Kasai, N. Morone, H. Sugimura, K. Tanaka, I. Sase, A. Yoshimura, Y. Nakano, T. K. Fujiwara, and A. Kusumi, "Biocompatible fluorescent silicon nanocrystals for single-molecule tracking and fluorescence imaging" The Journal of Cell Biology, 202, 967 (2013).
 26. D. Armand, H. Taniguchi, Y. Kadoya, T. Tanaka, and K. Tanaka, "Terahertz full horn-antenna characterization", Appl. Phys. Lett. 102, 141115 (2013).
 27. T. Yoshida, S. Kamada, S. Murata, and T. Aoki, "Fiber-based pulse stretcher for narrowband terahertz pulse generation with a chirped-pulse beating method", Appl. Phys. Lett. 103, 151118 (2013).
 28. H. Hirori and K. Tanaka, "Nonlinear optical phenomena induced by intense single-cycle terahertz pulses", IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 19, 8401110 (2013).
 29. S. Kamada, S. Murata, and T. Aoki, "On the Chirp of Narrowband Terahertz Pulses Generated by Photomixing with Nonlinearly Chirped Laser Pulse Pairs", Appl. Phys. Express 6, 032701 (2013).
 30. F. Blanchard, A. Doi, T. Tanaka, and K. Tanaka, "Real-Time, Subwavelength Terahertz Imaging", Annu. Rev. Mater. Res., 43:11.1 (2013).
 31. S. Kamada, T. Yoshida, and T. Aoki, "The chirp-control of frequency-tunable narrowband terahertz pulses by nonlinearly chirped laser pulse beating", Appl. Phys. Lett. 104, 101102 (2014).
 32. T. Yoshida, S. Kamada, S. Murata, and T. Aoki, "Suppressing Chirp of THz Pulses by Using an Optical Fiber as a Pulse Stretcher for Chirped Pulse Beating", JPS Conf. Proc. 1, 014027 (2014)
 33. S. Kamada, T. Yoshida, and T. Aoki, "Controlling Chirping of Narrowband THz Pulses Generated by Non-Linearly Chirped Pulse Beating", JPS Conf. Proc. 1, 014022 (2014).
 34. Y. Mukai, H. Hirori, T. Yamamoto, H. Kageyama, and K. Tanaka, "Antiferromagnetic resonance excitation by terahertz magnetic field resonantly enhanced with split ring resonator", Appl. Phys. Lett. 105, 022410 (2014).

35. F. Blanchard, K. Sumida, C. Wolpert, M. Tsotsalas, T. Tanaka, A. Doi, S. Kitagawa, D. G. Cooke, S. Furukawa, and K. Tanaka, "Terahertz phase contrast imaging of sorption kinetics in porous coordination polymer nanocrystals using differential optical resonator," Opt. Express, vol. 22, 11061-11069 (2014).
36. M. Hishida, K. Tanaka, Y. Yamamura, K. Saito, "Cooperativity between Water and Lipids in Lamellar to Inverted-Hexagonal Phase Transition", J. Phys. Soc. Jpn., 83, 044801 (2014).
37. Y. Onishi, Z. Ren, K. Segawa, M. Lorenc, H. Cailleau, Y. Ando, and K. Tanaka, "Ultrafast carrier relaxation through Auger recombination in the topological insulator Bi_{1.5}Sb_{0.5}Te_{1.7}Se_{1.3}", Phys. Rev. B 91 085306 (2015). selected as an Editor's suggestion
38. T. Yoshida, S. Kamada, and T. Aoki, "Elimination of the chirp of narrowband terahertz pulses generated by chirped pulse beating using a tandem grating pair laser pulse stretcher", Opt. Express 22, 23679-23685 (2014).
doi: 10.1364/OE.22.023679

(2) その他の著作物（総説、書籍など） 11 件

1. 土井厚志、「テラヘルツ顕微鏡」、書籍「テラヘルツ波新産業」(シーエムシー出版、2011年発行)
2. 田中耕一郎、タイトル「高輝度テラヘルツ波を用いた非線形分光」、書籍「テラヘルツ波新産業」(シーエムシー出版、2011年発行)
3. 永井正也、第 3 章テラヘルツ波光源、3-4 角度波面整合放射(フェムト秒レーザー励起) 3-5 ガスプラズマ 書籍「テラヘルツ波新産業」(シーエムシー出版 2011 年発行)
4. 廣理英基、田中耕一郎、「超高強度テラヘルツ光源の新展開」、掲載誌「オプトロニクス」, 30 巻 第 8 号, 頁 86-92, 発表年 2011
5. 田中耕一郎、廣理英基、「高強度テラヘルツ光による非線形光学現象」、掲載誌「固体物理」第46巻, 11号、129、発表年 2011
6. 永井正也、廣理英基、田中耕一郎、「高強度テラヘルツパルスが創る物性」、掲載誌「日本物理学会誌」, 66 巻, 第 12 号 919-922, 発表年 2011
7. 田中耕一郎、「テラヘルツ領域のエバネッセント光をもちいた水溶液の研究」、掲載誌「表面科学」第 32 巻, 12 号, 785、発表年 2011
8. 廣理英基、田中耕一郎、「高強度テラヘルツパルスで誘起する非線形光学現象」、応用物理学会誌, 81 巻 第 4 号, 頁 291-297, 発表年 2012
9. 田中耕一郎、廣理英基、「高強度テラヘルツ光発生と非線形テラヘルツ分光」、レーザー研究, 40 巻 第 7 号, 頁 480-485, 発表年 2012
10. 田中智子, 土井厚志, ブランチャード フランソワ, 「リアルタイムテラヘルツ近接場顕微鏡の開発とその応用」, 分光研究, 61 巻, 第 4 号, 頁 159-162, 発表年 2012
11. 田中智子, 土井厚志, ブランチャード フランソワ, 「リアルタイムテラヘルツ近接場顕微鏡の開発」, 応用物理学会誌, 82 巻 第2号, 頁 158-161, 発表年 2013

(3) 国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議 14 件、国際会議 43 件)

1. 学会名: NATO Advanced Research Workshop on Terahertz and Mid Infrared Radiation: Basic Research and Applications (TERA-MIR 2009)
発表者: M. Jewariya(Kyoto Univ.)
タイトル: Large Amplitude anharmonic vibrations driven by monocycle intense THz pulse

- 場所: Turunç-Marmaris,Turkey
月日: 2009/11/03-11/06
2. 学会名: The International Workshop on Terahertz Technology 2009 (TeraTech '09)
発表者: Koichiro Tanaka (Kyoto Univ.)
タイトル: Nonlinear coherent dynamics induced by intense terahertz field
場所: 大阪大学 中之島センター、大阪、日本
月日: 2009/11/30-12/3
3. 学会名: Asian Conference on Ultrafast Phenomena (ACUP)
発表者: Masaya Nagai (Kyoto Univ.)
タイトル: Intense THz pulse generation and THz nonlinear spectroscopy
場所: Taipei , Taiwan
月日: 2010/01/13
4. 学会名: 1st Ultrafast Dynamics Symposium
発表者: Masaya Nagai (Kyoto Univ.)
タイトル: Large-Amplitude anharmonic vibrations driven by intense THz pulse
場所: Hsinchu , Taiwan
月日: 2010/01/14
5. 学会名: 2009 年度第4回研究会「メタマテリアルの開発と応用」
発表者: 田中耕一郎 (京都大学)
タイトル: 2次元メタマテリアルの表面モード
場所: 京都, 日本
月日: 2010/01/09
6. 学会名: The 3rd International Workshop on Far-Infrared Technologies 2010
発表者: Koichiro Tanaka (Kyoto Univ.)
タイトル: Terahertz Non-linear Spectroscopy
場所: 福井大学 遠赤外領域開発研究センター、福井、日本
月日: 2010/03/15-03/17
7. 学会名: 2010年春季 第57回 応用物理学関係連合講演会シンポジウム
発表者: 田中耕一郎 (京都大学)
タイトル: テラヘルツ非線形光学
場所: 東海大学 湘南キャンパス、神奈川、日本
月日: 2010/03/17-03/20
8. 学会名: 日本物理学会 第65回年次大会
発表者: 永井 正也 (京都大学)
タイトル: 高強度テラヘルツ電磁パルス光源の開拓と光物性への応用
場所: 岡山大学、岡山、日本
月日: 2010/03/20-03/23
9. 学会名: 14th East Asian Workshop on Chemical Dynamics
発表者: Masaya Nagai (Kyoto Univ.)
タイトル: Molecules driven by intense THz pulse
場所: Nara, Japan
月日: 2010/05/11
10. 学会名: The Asia Pacific Laser Symposium (APLS)
発表者: Masaya Nagai (Kyoto Univ.)
タイトル: THz nonlinear spectroscopy with intense monocycle THz pulse
場所: Jeju island, Korea
月日: 2010/05/11-05/15
11. 学会名: The Conference on Lasers and Electro-Optics and The Quantum

- Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS 2010)
発表者: Ikufumi Katayama(Yokohama National Univ.)
タイトル: Nonlinear THz Spectroscopy on the Dielectric Thin Films
場所: San Jose USA
月日: 2010/05/17-05/22
12. 学会名: Advanced Photons and Science Evolution 2010
発表者: Masaya Nagai(Kyoto Univ.)
タイトル: Nonlinearity in terahertz photon physics
場所: Osaka, Japan
月日: 2010/06/14
13. 学会名: 17th International Conference on Dynamical Processes in Excited States of Solids (DPC '10)
発表者: Koichiro Tanaka(Kyoto Univ.)
タイトル: Nonlinear response of exciton transition under intense Terahertz pulse irradiation in ZnSe/ZnMgSSe multi-quantum wells
場所: Argonne National Laboratory, USA
月日: 2010/6/20~6/25
14. 学会名: 物性研短期研究会 外部場の時間操作と実時間物理現象
発表者: 永井 正也(京都大学)
タイトル: 高強度THz 電磁パルスを用いた非線形分光
場所: 東京大学物性研 柏、千葉、日本
月日: 2010/06/22-06/23
15. 学会名: C-PhoST フォーラム「高強度テラヘルツパルス生成とその利用」
発表者: 永井 正也(京都大学)
タイトル: 高強度モノサイクルTHz パルスを用いた水の非線形分光
場所: 分子研、岡崎、愛知、日本
月日: 2010/08/24
16. 学会名: 20th international conference on applied electromagnetics and communications (ICECom 2010)
発表者: Koichiro Tanaka(Kyoto Univ.)
タイトル: Dynamic THz near-field Imaging of free induction decay from tyrosine crystal
場所: Dubrovnik, Croatia
月日: 2010/9/20-9/23
17. 学会名: エクストリーム・フォトリクス研究シンポジウム
発表者: 永井 正也(京都大学)
タイトル: 高強度THz パルスによる物質制御
場所: 理化学研究所、和光、埼玉、日本
月日: 2010/10/12
18. 学会名: European optical society EOS 2010
発表者: Koichiro Tanaka(Kyoto Univ.)
タイトル: Enhancement of carrier scattering rate near the Mott density in photo-excited semiconductors
場所: Paris, France
月日: 2010/10/25-10/28
19. 学会名: The International Photonics and Opto Electronics Meetings (POEM2010)
発表者: Koichiro Tanaka(Kyoto Univ.)

- タイトル: Terahertz Non-Linear Spectroscopy in Solids
場所: Wuhan, China
月日: 2010/11/3-11/5
20. 学会名: Japan-Korea THz joint symposium
発表者: Koichiro Tanaka (Kyoto Univ.)
タイトル: Terahertz Non-Linear Spectroscopy in Solids
場所: Busan, Korea
月日: 2010/12/16-12/17
21. 学会名: International 2nd THz-Bio workshop
発表者: Koichiro Tanaka (Kyoto Univ.)
タイトル: High-power THz generation and its application
場所: Seoul, Korea
月日: 2011/01/19-01/20
22. 学会名: International Workshop on Optical Terahertz Science and Technology 2011
発表者: Koichiro Tanaka (Kyoto Univ.)
タイトル: Terahertz Non-Linear Spectroscopy in Solids
場所: Santa-Barbara, USA
月日: 2011/03/13-03/17
23. 学会名: CLEO Europe 2011
発表者: Koichiro Tanaka (Kyoto Univ.)
タイトル: Nonlinear spectroscopy using intense THz pulses with amplitudes exceeding 1 MV/cm
場所: Munich, Germany
月日: 2011/6/17-6/20
24. 学会名: 2011 International Symposium on Microwave/Terahertz Science and Applications (MTSA 2011)
発表者: Koichiro Tanaka (Kyoto Univ.)
タイトル: Recent Developments of Intense THz-Wave Generation and Nonlinear THz spectroscopy
場所: Nanjing China
月日: 2011/6/19-6/21
25. 学会名: THz Science and Technology – the castle meeting –
発表者: Koichiro Tanaka (Kyoto Univ.)
タイトル: Physics with high THz fields
場所: Marburg, Germany
月日: 2011/7/3-7/6
26. 学会名: International Symposium on Ultrafast Intense Laser Science 10
発表者: Koichiro Tanaka (Kyoto Univ.)
タイトル: High Power THz Wave Generation and Its Application to Nonlinear Spectroscopy
場所: Hotel auf der Wartburg, Eisenach, Germany
月日: 2011/10/16-10/20
27. 学会名: Super Imaging 2011
発表者: Koichiro Tanaka (Kyoto Univ.)
タイトル: Terahertz Nearfield Imaging
場所: Hamamatsu Japan
月日: 2011/12/12
28. 学会名: 2012 Photonics West, BiOS 2012

- 発表者: Koichiro Tanaka (Kyoto Univ.)
タイトル: Long-range hydration effect of lipid membrane studied by terahertz time-domain spectroscopy
場所: The Moscone Center, San Francisco, USA
月日: 2012/01/21-26
29. 学会名: 2012 Photonics West, LASE 2012
発表者: Hideki Hirori (Kyoto Univ.)
タイトル: Single-cycle terahertz pulses with amplitudes exceeding 1 MV/cm generated by optical rectification in LiNbO₃ and application to nonlinear optics
場所: The Moscone Center, San Francisco, USA
月日: 2012/01/21-26
30. 学会名: レーザー学会学術講演会第32回年次大会
発表者: 廣理英基 (京都大学)
タイトル: 超高強度THzパルスの発生と非線形THz分光への応用
場所: TKP仙台カンファレンスセンター, 仙台、宮城、日本
月日: 2012/01/30-02/01
31. 学会名: 3rd THz-BIO workshop
発表者: Koichiro Tanaka (Kyoto Univ.)
タイトル: Terahertz Near-Field Microscope for bio-sensing
場所: Seoul National University, Korea
月日: 2012/02/06-02/08
32. 学会名: Gordon Research Conference: Ultrafast Phenomena in Correlated Systems
発表者: Koichiro Tanaka (Kyoto Univ.)
タイトル: Nonlinear transport phenomena driven by intense terahertz electric field
場所: Galvez Hotel, Huston USA
月日: 2012/02/19-02/24
33. 学会名: International Forum on Terahertz Spectroscopy and Imaging , 5th Workshop on Terahertz Technology
発表者: Koichiro Tanaka (Kyoto Univ.)
タイトル: Terahertz Near-field Microscope working at Video Rate
場所: Fraunhofer-Zentrum Fraunhofer Platz 1, Kaiserslautern Germany
月日: 2012/03/06-03/07
34. 学会名: テラテック技術討論会
発表者: 廣理英基 (京都大学)
タイトル: 高強度テラヘルツパルスで誘起する非線形光学現象
場所: 東京大学本郷キャンパス 工学部2号館第2会議室、東京、日本
月日: 2012/03/21
35. 学会名: The 1st Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS'12)
発表者: Koichiro Tanaka (Kyoto Univ.)
タイトル: Terahertz Nonlinear Spectroscopy with Intense Half-Cycle Pulses
場所: Pacifico Yokohama Yokohama, Japan
月日: 2012/04/26~04/27
36. 学会名: Biophotonics Symposium: Terahertz Waves & Interactions with Biological Structures
発表者: Koichiro Tanaka (Kyoto Univ.)

- タイトル: Terahertz Near-Field Microscope for bio-sensing
 場所: University of California, Davis, Sacramento, CA, USA
 月日: 2012/06/29
37. 学会名: The 10th International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter, Nanostructured and Molecular Materials (EXCON2012)
 発表者: Hideki Hirori (Kyoto Univ.)
 タイトル: Extraordinary carrier multiplication induced by single-cycle terahertz pulses with amplitudes exceeding 1 MV/cm
 場所: de Oosterpoort, Groningen, Netherland
 月日: 2012/07/02-07/06
38. 学会名: 18th Ultrafast Phenomena Conference (UP2012)
 発表者: Koichiro Tanaka (Kyoto Univ.)
 タイトル: Nonlinear Terahertz Spectroscopy in Solids with Single-Cycle Terahertz Pulses
 場所: Lausanne, Switzerland
 月日: 2012/07/09-07/13.
39. 学会名: 34th International Free Electron Laser Conference (FEL2012)
 発表者: Koichiro Tanaka (Kyoto Univ.)
 タイトル: High-Power Terahertz Generation and Terahertz Nonlinear Spectroscopy
 場所: Nara, Japan
 月日: 2012/08/26-08/31.
40. 学会名: DYCE 公開フォーラム
 発表者: 田中耕一郎 (京都大学)
 タイトル: 半導体におけるテラヘルツ非線型伝導
 場所: 東京大学本郷キャンパス小柴ホール、日本
 月日: 2012/8/6
41. 学会名: DYCE International Workshop
 発表者: Koichiro Tanaka (Kyoto Univ.)
 タイトル: Terahertz spectroscopy in solids with single-cycle terahertz pulses
 場所: Kussharo, Hokkaido, Japan
 月日: 2012/08/7-8/11
42. 学会名: 37th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz2012)
 発表者: Koichiro Tanaka (Kyoto Univ.)
 タイトル: Nonlinear carrier dynamics induced by intense terahertz wave
 場所: University of Wollongong, Wollongong, Australia
 月日: 2012/09/23-09/28
43. 学会名: 2012年 秋季第73回応用物理学会学術講演会
 発表者: 田中耕一郎 (京都大学)
 タイトル: 高強度テラヘルツ電磁波を用いた半導体超格子の伝導制御
 場所: 愛媛大学城北地区、松山大学文京キャンパス、愛媛、日本
 月日: 2012/09/11-09/14
44. 学会名: 日本物理学会 2012年 秋季大会
 発表者: 田中耕一郎 (京都大学)
 タイトル: 高強度テラヘルツ光が拓く非平衡物性科学
 場所: 横浜国立大学、横浜、日本
 月日: 2012/09/18-09/21
45. 学会名: International Symposium on Frontiers in THz Technology (FTT 2012)

- 発表者: Koichiro Tanaka (Kyoto Univ.)
 タイトル: Terahertz Spectroscopy in Solids with Single-Cycle Terahertz Pulses
 場所: Nara, Japan
 月日: 2012/11/27-11/29.
46. 学会名: Nonlinear Optics (NLO2013)
 発表者: Hideki Hirori (Kyoto Univ.)
 タイトル: High-power Terahertz Pulse Generation and Application to Nonlinear THz Spectroscopy
 場所: The Fairmont Orchid, Kohala Coast, Hawaii, USA
 月日: 2013/07/21-07/26
47. 学会名: 18th International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (EDISON18)
 発表者: Hideki Hirori (Kyoto Univ.)
 タイトル: High-power Terahertz Pulse Generation and Application to Nonlinear THz Spectroscopy
 場所: Kunibiki Messe, Matsue, Japan
 月日: 2013/07/22-07/26
48. 学会名: 1st WPI Workshop on Materials Science - the 10th France-Japan Workshop on Nanomaterials
 発表者: Koichiro Tanaka (Kyoto Univ.)
 タイトル: Terahertz Photonics for Material Science
 場所: Kyoto, Japan
 月日: 2013/07/07
49. 学会名: 2013 International Symposium on Microwave/Terahertz Science and Applications (MTSA 2013)
 発表者: Koichiro Tanaka (Kyoto Univ.)
 タイトル: Nonlinear Terahertz Spectroscopy in Semiconductors
 場所: Shanghai, China
 月日: 2013/07/22-07/23
50. 学会名: International Conference on Dynamical Processes in Excited States of Solids (DPC2013)
 発表者: Koichiro Tanaka (Kyoto Univ.)
 タイトル: Nonlinear Terahertz Spectroscopy in Semiconductors
 場所: Fuzhou, China
 月日: 2013/08/04-08/09
51. 学会名: 6th Asian Summer School and Symposium on Laser-Plasma Acceleration and Radiation
 発表者: Koichiro Tanaka (Kyoto Univ.)
 タイトル: Nonlinear Terahertz Spectroscopy in Semiconductors
 場所: Kizu, Japan
 月日: 2013/09/03-09/06
52. 学会名: 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2013)
 発表者: Koichiro Tanaka (Kyoto Univ.)
 タイトル: Terahertz Nonlinear Spectroscopy
 場所: Kyoto, Japan
 月日: 2013/06/30
53. 学会名: 21st International Conference on Applied Electromagnetics and Communications (ICECom2013)

- 発表者: Koichiro Tanaka (Kyoto Univ.)
 タイトル: Nonlinear Terahertz Spectroscopy in Dirac Electron System
 場所: Dubrovnik, Croatia
 月日: 2013/10/14-10/16
54. 学会名: Swiss-Kyoto Symposium
 発表者: Koichiro Tanaka (Kyoto Univ.)
 タイトル: Transient spin polarized current induced by femtosecond pulse excitation in topological insulators
 場所: Zurich, Switzerland
 月日: 2013/11/21-11/22
55. 学会名: Gordon Research Conferences on Ultrafast Phenomena in Cooperative System
 発表者: Koichiro Tanaka (Kyoto Univ.)
 タイトル: Introduction to Structural Transitions and Molecular Materials Session
 場所: Ventura, USA
 月日: , Feb. 2-5, 2014.
56. 学会名: 日本物理学会 第 69 回年次大会
 発表者: 谷峻太郎 (京都大学)
 タイトル: グラフェンのテラヘルツ限界駆動
 場所: 東海大学 湘南キャンパス、神奈川、日本
 月日: 2014/03/27-03/28
57. 学会名: 応用物理学会 第 61 回応用物理学会春季学術講演会
 発表者: 廣理英基 (京都大学)
 タイトル: 超高強度 THz 光源の開発と THz 非線形分光
 場所: 青山学院大学 相模原キャンパス、神奈川、日本
 月日: 2014/03/17-03/20

②口頭発表 (国際会議 36 件)
 (国内会議に関しては省略し、国際会議のみ記載した。)

1. 学会名: The Asia Pacific Laser Symposium (APLS), APLS 2010
 発表者: Masaya Nagai (Kyoto Univ.)
 タイトル: Nonlinear transmission spectroscopy of amino acid microcrystals using intense monocycle THz pulse
 場所: Jeju island, Korea
 月日: 2010/05/14
2. 学会名: The Conference on Lasers and Electro-Optics and The Quantum Electronics and Laser Science conference (CLEO/QELS 2010)
 発表者: Masaya Nagai (Kyoto Univ.)
 タイトル: THz Nonlinearity of Water Observed with Intense THz Pulses
 場所: San Jose, USA
 月日: 2010/5/17-10/22
3. 学会名: The Conference on Lasers and Electro-Optics and The Quantum Electronics and Laser Science conference (CLEO/QELS 2010)
 発表者: Hideki Hirori (Kyoto Univ.)
 タイトル: Nonperturbative Excitonic Interaction with Intense THz Pulses in ZnSe/ZnMgSSe Multiple Quantum Wells

- 場所: San Jose, USA
月日: 2010/05/17-05/22
4. 学会名: International conference on excitonic and photonic processes in condensed and nano materials
発表者: Shuntaro Tani (Kyoto Univ.)
タイトル: Enhancement of carrier scattering rate near the Mott density in photo-excited semiconductors
場所: Brisbane, Australia
月日: 2010/07/11-07/16
5. 学会名: 35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW/THz2010)
発表者: Masaya Nagai (Kyoto Univ.)
タイトル: Water molecules driven by intense THz pulses
場所: Rome, Italy
月日: 2010/09/06
6. 学会名: European optical society EOS 2010
発表者: Koichiro Tanaka (Kyoto Univ.)
タイトル: Enhancement of carrier scattering rate near the Mott density in photo-excited semiconductors
場所: Parc floral de Paris, France
月日: 2010/10/25-10/28
7. 学会名: European optical society EOS 2010
発表者: Francois Blanchard (Kyoto Univ.)
タイトル: Dynamic THz near-field Imaging of free induction decay from tyrosine crystal
場所: Parc floral de Paris, France
月日: 2010/10/25-10/28
8. 学会名: International Workshop on Optical Terahertz Science and Technology 2011
発表者: Francois Blanchard (Kyoto Univ.)
タイトル: Near-field imaging of THz field enhancement
場所: Santa-Barbara, USA
月日: 2011/03/13-03/17
9. 学会名: The conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2011)
発表者: Hideki Hirori (Kyoto Univ.)
タイトル: Highly Efficient Carrier Multiplication and Bright Exciton Luminescence under Intense Terahertz Pulse (ポストデッドライン論文に選出)
場所: Baltimore, USA
月日: 2011/05/01-05/06
10. 学会名: CLEO Europe 2011
発表者: Atsushi Doi (Olympus corp.)
タイトル: Development of real-time near-field THz microscope
場所: Munich, Germany
月日: 2011/05/22-05/26
11. 学会名: 4th International Conference on Photoinduced Phase Transitions and Cooperative Phenomena (PIPT4)
発表者: Koichiro Tanaka (Kyoto Univ.)
タイトル: Nonequilibrium Fluctuation of Photo-Induced Phase under Steady Light Irradiation in the Spin Crossover Complex

- 場所: Wrocław, Poland
月日: 2011/06/28-07/02
12. 学会名: 17th International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (EDISON 17)
発表者: Hideki Hirori(Kyoto Univ.)
タイトル: Extraordinary Carrier Multiplication in GaAs MQWs by Intense Terahertz Pulse Excitation
場所: Santa Barbara(米国)
月日: 2011/08/08-08/12
13. 学会名: 17th International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (EDISON 17)
発表者: Shuntaro Tani (Kyoto Univ.)
タイトル: Enhancement of carrier scattering rate near the Mott density in photo-excited semiconductors
場所: Santa Barbara, USA
月日: 2011/08/08-08/12
14. 学会名: The Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO-PR)
発表者: Jiro Kitagawa (Hiroshima Univ.)
タイトル: New Design of Terahertz Metallic Photonic Crystal with Mechanically Tunable Photonic-Band-Gap
場所: Sydney, Australia
月日: 2011/08/28-09/01
15. 学会名: 36th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz2011)
発表者: Hideki Hirori (Kyoto Univ.)
タイトル: Extraordinary carrier multiplication in GaAs MQWs induced by intense terahertz pulse
場所: Huston, USA
月日: 2011/10/03-10/07
16. 学会名: 36th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz2011)
発表者: F. Blanchard (Kyoto Univ.)
タイトル: Near-field THz imaging of a split ring resonator matrix
場所: Houston, USA
月日: 2011/10/03-10/07
17. 学会名: 36th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz2011)
発表者: Damien Armand (Hiroshima Univ.)
タイトル: Controlling the Surface Plasmon Extension
場所: Houston, USA
月日: 2011/10/03-10/07
18. 学会名: 36th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz2011)
発表者: Yu Mukai (Kyoto Univ.)
タイトル: Non-linear Terahertz Spectroscopy of Acceptors in p-Ge
場所: Houston, USA
月日: 2011/10/03-10/07
19. 学会名: 36th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz2011)
発表者: Shuntaro Tani (Kyoto Univ.)

- タイトル: Terahertz-wave induced near-infrared transparency in Graphene
場所: Houston, USA
月日: 2011/10/03-10/07
20. 学会名: GCOE Symposium 2011
発表者: Shuntaro Tani (Kyoto Univ.)
タイトル: Quest for Extreme Terahertz Nonlinear Optics: on Dirac Fermions in Graphene
場所: Kyoto, Japan
月日: 2012/02/13~02/15
21. 学会名: 3rd EOS Topical Meeting on Terahertz Science & Technology (TST 2012)
発表者: Shuntaro Tani (Kyoto Univ.)
タイトル: Ultrafast Carrier Transport in Graphene under High Electric Field
場所: Prague, Czech Republic
月日: 2012/06/17-06/20
22. 学会名: 3rd EOS Topical Meeting on Terahertz Science & Technology (TST 2012)
発表者: Keisuke Shinokita (Kyoto Univ.)
タイトル: Dynamics of Optically Excited Carriers under Intense Terahertz Pulse in GaAs Multiple Quantum Wells
場所: Prague, Czech Republic
月日: 2012/06/17-06/20
23. 学会名: 3rd EOS Topical Meeting on Terahertz Science & Technology (TST 2012)
発表者: Yu Mukai (Kyoto Univ.)
タイトル: Terahertz Electric Field Induced Tunnel Ionization of p-type Germanium
場所: Prague, Czech Republic
月日: 2012/06/17-06/20
24. 学会名: 3rd EOS Topical Meeting on Terahertz Science & Technology (TST 2012)
発表者: Tomoko Tanaka (Kyoto Univ.)
タイトル: Near-field terahertz imaging of a defect in split ring resonator
場所: Prague, Czech Republic
月日: 2012/06/17-06/20
25. 学会名: 3rd EOS Topical Meeting on Terahertz Science & Technology (TST 2012)
発表者: Shingo Miyamoto (Hiroshima Univ.)
タイトル: Direct measurement of local THz electric field and its enhancement in the gap of dipole antennas
場所: Prague, Czech Republic
月日: 2012/06/17-06/20
26. 学会名: 12th Asia Pacific Physics Conference of AAPPS
発表者: Shohei Kamada (Waseda Univ.)
タイトル: Controlling chirping of narrowband THz pulses generated by non-linearly chirped pulse beating
場所: Chiba, Japan
月日: 2013/07/14-07/19
27. 学会名: International Workshop on Optical Terahertz Science and Technology 2013(OTST2013)

- 発表者: Hideki Hirori (Kyoto Univ.)
 タイトル: Dynamics of Optically Excited Carriers under Intense Terahertz Pulse in GaAs Quantum Wells
 場所: Kyoto Terssa, Japan
 月日: 2013/04/01-04/05
28. 学会名: International Workshop on Optical Terahertz Science and Technology 2013(OTST2013)
 発表者: Tomoko Tanaka (Kyoto Univ.)
 タイトル: Terahertz Near-field Microscopic Analysis of Mouse Keratinocytes
 場所: Kyoto Terssa, Japan
 月日: 2013/04/01-04/05
29. 学会名: International Workshop on Optical Terahertz Science and Technology 2013(OTST2013)
 発表者: Atsushi Doi (OLYMPUS)
 タイトル: Observation of living adipocytes by terahertz near-field microscope
 場所: Kyoto Terssa, Japan
 月日: 2013/04/01-04/05
30. 学会名: International Multidisciplinary Microscopy Congress (InterM2013)
 発表者: Tomoko Tanaka (Kyoto Univ.)
 タイトル: THz near-field microscope for cell imaging
 場所: Antalya, Turkey
 月日: 2013/10/10-10/13
31. 学会名: 4th International Symposium on Terahertz Nanoscience
 発表者: Shuntaro Tani (Kyoto Univ.)
 タイトル: High field dynamics of Dirac electrons in graphene
 場所: Osaka, Japan
 月日: 2014/03/13-03/14
32. 学会名: CLEO-PR & OECC/PS 2013
 発表者: Keisuke Shinokita (Kyoto Univ.)
 タイトル: Photoluminescence Flash Induced by Intense Single-Cycle Terahertz Pulses in Undoped GaAs Quantum Wells
 場所: Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan
 月日: 2013/06/30-07/04
33. 学会名: International Multidisciplinary Microscopy Congress (INTERM2013)
 発表者: Tomoko Tanaka (Kyoto Univ.)
 タイトル: THz near-field microscope for cell imaging.
 場所: Antalya, Turkey
 月日: 2013/10/10~10/13
34. 学会名: 4th EOS Topical Meeting on Terahertz Science & Technology (TST2014)
 発表者: Tomoko Tanaka (Kyoto Univ.)
 タイトル: Terahertz Near-field Imaging for Fractal Metallic Structures
 月日: 2014/05/12~05/12
35. 学会名: 4th EOS Topical Meeting on Terahertz Science and Technology (TST2014)
 発表者: Damien Armand (Hiroshima Univ.)
 タイトル: Bullseye with broken symmetry for coupling free space radiation to

cylindrical substrate's mode

場所: Camogli, Italy

月日: 2014/05/11~05/14

36. 学会名: 4th EOS Topical Meeting on Terahertz Science and Technology (TST2014)
発表者: 有川 敬 (京都大学)
タイトル: Terahertz-induced electron localization in a quantum Hall system
場所: Camogli, Italy
月日: 2014/05/11~05/14

③ ポスター発表 (国際会議 40 件)

(国内会議に関しては詳細を省略し、国際会議のみ記載した。)

1. 学会名: International Workshop on Terahertz Technology (TeraTech'09)
発表者: Jewaria Mukesh (Kyoto Univ.)
タイトル: Nonlinear transmission spectroscopy of amino acids microcrystals using a high power monocycle THz pulse
場所: Osaka, Japan
月日: 2009/11/30-12/03
2. 学会名: International Workshop on Terahertz Technology (TeraTech'09)
発表者: Hideki Hirori (Kyoto Univ.)
タイトル: Crossover of excitonic interaction with terahertz electric field from perturbative to nonperturbative regime
場所: Osaka, Japan
月日: 2009/11/30-12/03
3. 学会名: International Workshop on Terahertz Technology (TeraTech'09)
発表者: Atsushi Doi (OLYMPUS)
タイトル: Real-time near-field imaging of crystalline tyrosine blinking with terahertz free-induction-decay
場所: Osaka, Japan
月日: 2009/11/30-12/03
4. 学会名: The 7th Asia-Pacific Laser Symposium (APLS2010)
発表者: Keisuke Shinokita (Kyoto Univ.)
タイトル: Dynamical Franz-Keldysh Effect in GaAs Induced by Monocycle Terahertz pulse
場所: Jeju island, Korea
月日: 2010/05/11-05/15
5. 学会名: International Soft Matter Conference 2010
発表者: Mafumi Hishida (Kyoto Univ.)
タイトル: Confined water in lamellar phase studied by THz time-domain spectroscopy on fully hydrated phospholipid bilayers
場所: Granada Exhibition and Conference Centre, Granada, Spain
月日: 2010/07/05-07/08
6. 学会名: International Symposium on Non-Equilibrium Soft Matter 2010
発表者: Mafumi Hishida (Kyoto Univ.)
タイトル: Global hydration state of phospholipid bilayer studied by THz time-domain spectroscopy
場所: Nara Prefectural New Public Hall, Nara
月日: 2010/8/17-8/20

7. 学会名: Coherent Multi-Dimensional Spectroscopy 2010
発表者: Koichiro Tanaka (Kyoto Univ.)
タイトル: Ladder Climbing on the Anharmonic Intermolecular Potential in Amino-Acid Microcrystals with Intense Monocycle THz Pulse
場所: Minneapolis, USA
月日: 2010/8/17-8/20
8. 学会名: 35th international conference on infrared, Millimeter and Terahertz Waves(IRMMW-THz 2010)
発表者: Keisuke Shinokita(Kyoto Univ.)
タイトル: Dynamical Franz-Keldysh Effect in GaAs Induced by Monocycle Terahertz pulse
場所: Rome, Italy
月日: 2010/09/05-09/11
9. 学会名: 35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves
発表者: Hideaki Tanaka (Hiroshima Univ.)
タイトル: Enhancement of THz field in a gap of dipole antenna
場所: Rome, Italy
月日: 2010/9/05-09/11
10. 学会名: 8th iCeMS International Synposium "Meso-Control of Functional Architectures"
発表者: Mafumi Hishida (Kyoto Univ.)
タイトル: Long-range hydration state of phospholipid bilayer studied by THz time-domain spectroscopy
場所: Kyoto University, Japan
月日: 2010/11/9-11/11
11. 学会名: 8th iCeMS International Synposium "Meso-Control of Functional Architectures"
発表者: Hideki Hirori (Kyoto Univ.)
タイトル: Terahertz nonlinear spectroscopy on single quantum dots
場所: Kyoto University, Japan
月日: 2010/11/9-11/11
12. 学会名: International 2nd THz-Bio workshop
発表者: Francois Blanchard (Kyoto Univ.)
タイトル: Near-field imaging of THz field enhancement
場所: Seoul, Korea
月日: 2011/01/19-01/20
13. 学会名: International Workshop on Optical Terahertz Science and Technology 2011(OTST2011)
発表者: Tomoko Tanaka (Kyoto Univ.)
タイトル: Spectroscopic imaging of micro-crystals using real-time THz near-field microscope
場所: University of California, Santa Barbara, USA
月日: 2011/03/13-03/17
14. 学会名: THz Science and Technology-Castle Meeting-
発表者: Tomoko Tanaka (Kyoto Univ.)
タイトル: Real-time THz Near-Field Microscope
場所: Marburg, Germany
月日: 2011/07/03-07/06

15. 学会名: THz Science and Technology-Castle Meeting-
 発表者: Shuntaro Tani (Kyoto Univ.)
 タイトル: Terahertz-Wave Induced Near-Infrared Transparency in Graphene
 場所: Marburg, Germany
 月日: 2011/07/03-07/06
16. 学会名: TeraNano PIRE Kick-Off Meeting
 発表者: Hideki Hirori (Kyoto Univ.)
 タイトル: THz Pulse Induced Photoluminescence from GaAs Multiple Quantum Wells
 場所: Rice University, Huston USA
 月日: 2011/10/07
17. 学会名: 17th International Conference of Electron Dynamics in Semiconductors
 発表者: Koichiro Tanaka (Kyoto Univ.)
 タイトル: Terahertz field ionization of acceptors in p-Ge, Optoelectronics and Nanostructures
 場所: Houston, TX, USA
 月日: 2011/07/03-07/06
18. 学会名: International Symposium on Terahertz Nanoscience (TeraNano 2011)
 発表者: Shuntaro Tani (Kyoto Univ.)
 タイトル: Terahertz-wave induced near-infrared transparency in Graphene
 場所: Osaka, Japan
 月日: 2011/11/24 -11/29
19. 学会名: International Symposium on Terahertz Nanoscience (TeraNano 2011)
 発表者: Keisuke Shinokita (Kyoto Univ.)
 タイトル: Dynamics of Optically Excited Carriers under Intense Terahertz Pulse in GaAs Multiple Quantum Wells
 場所: Osaka, Japan
 月日: 2011/11/24-11/29
20. 学会名: Gordon Research Conference: Ultrafast Phenomena in Correlated Systems
 発表者: Hideki Hirori (Kyoto Univ.)
 タイトル: Extraordinary Carrier Multiplication Gated by a Picosecond Electric Field Pulse
 場所: Galvez Hotel, Huston USA
 月日: 2012/02/19-02/24
21. 学会名: 3rd EOS Topical Meeting on Terahertz Science and Technology (TST2012)
 発表者: Damien Armand (Hiroshima Univ.)
 タイトル: Photonic crystal between metallic parallel plates, effect of air gap on band structure
 場所: Prague, Czech Republic
 月日: 2012/06/17-06/20
22. 学会名: 3rd EOS Topical Meeting on Terahertz Science and Technology (TST2012)
 発表者: Damien Armand (Hiroshima Univ.)
 タイトル: Horn antenna in THz regime
 場所: Prague, Czech Republic
 月日: 2012/06/17-06/20

23. 学会名: the 10th International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter, Nanostructured and Molecular Materials (EXCON2012)
発表者: Francois Blanchard (Kyoto Univ.)
タイトル: Near-field terahertz imaging of a defect in split ring resonator
場所: de Oosterpoort, Groningen, Netherland
月日: 2012/07/02-07/06.
24. 学会名: 38th International Conference on Infrared, Milimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz2013)
発表者: Damien Armand (Hiroshima Univ.)
タイトル: Photonic Crystal Sandwiched In Parallel Plates As THz Waveguide
場所: Mainz, Germany
月日: 2013/09/14-09/19
25. 学会名: International Workshop on Optical Terahertz Science and Technology 2013(OTST2013)
発表者: Shohei Kamada (Waseda Univ.)
タイトル: Effect of cubic spectral phase of pulse stretcher in narrow-band terahertz pulse generation by chirped-pulse beating
場所: Kyoto Terssa, Japan
月日: 2013/04/01-04/05
26. 学会名: 12th Asia Pacific Physics Conference of AAPPS
発表者: Tetsuya Yoshida (Waseda Univ.)
タイトル: Suppressing chirp of THz pulses by using an optical fiber as a pulse stretcher for chirped pulse beating
場所: Chiba, Japan
月日: 2013/07/14-07/19
27. 学会名: International Workshop on Optical Terahertz Science and Technology 2013(OTST2013)
発表者: Shuntaro Tani (Kyoto Univ.)
タイトル: Nonlinear Current Induced by Strong Terahertz-wave Irradiation in Graphene
場所: Kyoto Terssa, Japan
月日: 2013/04/01-04/05
28. 学会名: International Workshop on Optical Terahertz Science and Technology 2013(OTST2013)
発表者: Tomohiro Tamaya (Kyoto Univ.)
タイトル: Theory of Carrier Dynamics in graphene under High-intensity Electric Fields
場所: Kyoto Terssa, Japan
月日: 2013/04/01-04/05
29. 学会名: International Workshop on Optical Terahertz Science and Technology 2013(OTST2013)
発表者: Keisuke Shinokita (Kyoto Univ.)
タイトル: THz-wave activation of trapped carriers in GaAs multiple quantum wells
場所: Kyoto Terssa, Japan
月日: 2013/04/01-04/05
30. 学会名: International Workshop on Optical Terahertz Science and Technology 2013(OTST2013)
発表者: François Blanchard (Kyoto Univ.)
タイトル: Subwavelength terahertz spectroscopy of methanol trapping in

porous coordination polymer nanocrystals

場所: Kyoto Terssa, Japan

月日: 2013/04/01-04/05

31. 学会名: International Workshop on Optical Terahertz Science and Technology 2013(OTST2013)

発表者: Krushna Mavani, (Osaka Univ.)

タイトル: Ultrafast Photo-induced Effect and Corresponding Magnetization of Pr_{0.5} Sr_{0.5} MnO₃ Thin Film as Investigated by Visible Pump Terahertz Probe Spectroscopy

場所: Kyoto Terssa, Japan

月日: 2013/04/01-04/05

32. 学会名: International Conference on Optics of Excitons in Confined Systems 13th (OECS 13)

発表者: Naotaka Yoshikawa (Kyoto Univ.)

タイトル: Generation of trions in CdSe/ZnS core/shell quantum dots under high-density excitation

場所: Rome, Italy

月日: 2013/09/09-09/13

33. 学会名: International Conference on Optics of Excitons in Confined Systems 13th (OECS 13)

発表者: Koichiro Tanaka (Kyoto Univ.)

タイトル: Photoluminescence Flash Stimulated by a Strong Single-Cycle Terahertz Pulse in GaAs Quantum Wells

場所: Rome, Italy

月日: 2013/09/09-09/13

34. 学会名: Gordon Reserch Conference (Ultrafast Phenomena in Cooperative Systems)

発表者: Yoshito Onishi (Kyoto Univ.)

タイトル: Transient spin polarized current induced by femtosecond pulse excitation in topological insulators

場所: Ventura, USA

月日: 2014/02/02-02/07

35. 学会名: Gordon Reserch Conference (Ultrafast Phenomena in Cooperative Systems)

発表者: Shuntaro Tani (Kyoto Univ.)

タイトル: Ultrafast Carrier Dynamics In Graphene under a High Electric Field

場所: Ventura, USA

月日: 2014/02/02-02/07

36. 学会名: Le regroupement québécois sur les matériaux de pointe

発表者: Francois Blanchard (Kyoto Univ.)

タイトル: Subwavelength terahertz spectroscopy of methanol trapping in porous coordination polymer nanocrystals

場 所: CENTRE MONT-ROYAL, 2200 RUE MANSFIELD, MONTRÉAL,

Canada

月日: 2013/5/17

37. 学会名: International Workshop on Optical Terahertz Science and Technology (OTST) 2013

発表者: Shohei Kamada (Waseda Univ.)

タイトル: Effect of cubic spectral phase of pulse stretcher in narrow-band terahertz pulse generation by chirped-pulse beating

- 場所: Kyoto, Japan
月日: 2013/04/01~04/05
38. 学会名: The 12th Asia Pacific Physics Conference of AAPPS (APPC12)
発表者: Tetsuya Yoshida (Waseda Univ.)
タイトル: Suppressing chirp of THz pulses by using an optical fiber as a pulse stretcher for chirped pulse beating
場所: Chiba, Japan
月日: 2013/07/14~07/19
39. 学会名: International Workshop on Optical Terahertz Science and Technology (OTST2013)
発表者: Damien Armand (Hiroshima Univ.)
タイトル: Characteristics of Efficient Horn-Antenna
場所: 京都テルサ
月日: 2013/04/01~04/05
40. 学会名: The 38th International Conference on Infrared, Milimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz2013)
発表者: Damien Armand (Hiroshima Univ.)
タイトル: Photonic Crystal Sandwiched In Parallel Plates As THz Waveguide
場所: Mainz, Germany
月日: 2013/09/02~09/06

(4) 知財出願

①国内出願 (11 件)

1. テラヘルツ波発生装置、土井厚志、雙木満、オリンパス株式会社、2010/3/24、2010-068389
2. 観察装置、土井厚志、雙木満、オリンパス株式会社、2010/3/24、2010-068649
3. イメージング装置、土井厚志、フランソワ ブランシャール、オリンパス株式会社、京都大学、2010/10/25、2010-238869.
4. 分析装置および分析方法、土井厚志、フランソワ ブランシャール、オリンパス株式会社、京都大学、2011/1/18、2011-007474
5. テラヘルツ波発生装置、土井厚志、オリンパス株式会社、2011/10/20、2011-231036
6. イメージング装置、土井厚志、フランソワ ブランシャール、オリンパス株式会社、京都大学、2011/10/24、2011-232930
7. 観察方法および観察装置、土井厚志、オリンパス株式会社、2012/3/19、2012-061955
8. パルスフロント傾斜光学系及びテラヘルツ波発生装置、土井厚志、オリンパス株式会社、2012/8/28、2012-187790
9. 観察装置、土井厚志、フランソワ ブランシャール、オリンパス株式会社、京都大学、2012/3/28、2013-069613
10. 液体及び細胞測定用素子、及びそれを用いた測定装置、土井厚志、オリンパス株式会社、2012/3/28、2013-069616
11. 観察装置、土井厚志、オリンパス株式会社、2014/1/23、2014-010615

②海外出願 (1 件)

1. TERAHERTZ WAVE GENERATOR、土井厚志、雙木満、オリンパス株式会社、2011/3/8、PCT/JP2011/001360、13/636937、US

(5) 受賞・報道等

①受賞

1. 2011 Young Researcher Award, Shuntaro Tani, International Symposium on Terahertz Nanoscience (TeraNano 2011), Workshop of International Terahertz Research Network (GDR-I), November 24, 2011
2. 2011 Young Researcher Award, Keisuke Shinokita, International Symposium on Terahertz Nanoscience (TeraNano 2011), Workshop of International, Terahertz Research Network (GDR-I), November 24, 2011
3. 第6回大阪大学近藤賞(論文賞), “超高強度テラヘルツ光源の開発と非線形光学現象への応用”, 廣理英基, 2012 年 4 月 17 日
4. 2011 Young Researcher Award, Shuntaro Tani, 3rd EOS Topical Meeting on Terahertz Science and Technology (TST2012), June 17~22, 2012
5. 第 7 回日本物理学会若手奨励賞, “超高強度テラヘルツ光源の開発と非線形光学現象の観測に関する研究”, 廣理英基, 2013 年 3 月 28 日
- * 6. 平成26年度文部科学大臣表彰 科学技術賞 研究部門 「高強度テラヘルツ光による物質の非線形光学応答の研究」, 田中耕一郎, 2014 年 4 月 7日
7. レーザー学会 論文賞(解説部門), “高強度テラヘルツ光発生と非線形テラヘルツ分光”, 田中耕一郎、廣理英基, 2014 年 4 月 18 日
- * 8. 第 6 回ドイツ・イノベーション・アワード・ゴッドフリードワグネル賞(秀賞), “超高強度テラヘルツ光源の開発と非線形光学現象への応用に関する研究”, 廣理英基, 2014 年 6 月 18 日

②マスコミ(新聞・TV等)報道

1. 原著論文 3.に関連してプレスリリースを京都大学と JST の共同でおこなった。
プレスリリース: (2010 年 11 月 1 日)
「熱を加えずに結晶を柔らかくすることに成功～高強度テラヘルツ電磁パルスで分子ネットワーク操作が可能に～」
<http://www.jst.go.jp/pr/announce/20101101/index.html>
<http://www.icems.kyoto-u.ac.jp/j/pr/2010/11/01-nr.html#cov>
- (1) 京都新聞(2010 年 11 月 2 日)25 面 「熱加えず分子同士の結合緩和 京大教授ら手法開発」
- (2) 日刊工業新聞(2010 年 11 月 2 日)24 面「京大、テラヘルツ波照射で結晶を柔らかくすることに成功」
- (3) External Link EurekAlert! “Softening crystals without heat: Using terahertz pulses to manipulate molecular networks” (2010.11.9)
http://www.eurekalert.org/pub_releases/2010-11/ific-scw110910.php
- (4) External Link R&D Magazine “Softening crystals without heat” (2010.11.9)
<http://www.rdmag.com/News/2010/11/General-Science-Physics-Softening-Crystals-Without-Heat/>
- (5) External Link ScienceDaily “Softening Crystals Without Heat: Using Terahertz Pulses to Manipulate Molecular Networks” (2010.11.12)
<http://www.sciencedaily.com/releases/2010/11/101109095324.htm>
- (6) 朝日新聞(2010 年 11 月 16 日)23 面

2. 原著論文 9.に関連してプレスリリースを京都大学と JST の共同でおこなった。

プレスリリース: (2011 年 12 月 21 日)

「1 兆分の 1 秒間の強電場パルス照射により半導体の自由電子数を 1 千倍に増幅:超高速トランジスタや高効率の太陽電池の開発に期待」

<http://www.jst.go.jp/pr/announce/20111221/index.html>

<http://www.icems.kyoto-u.ac.jp/j/pr/2011/12/21-nr.html>

(1) 日経産業新聞 (2011 年 12 月 22 日)「京大など、半導体にテラヘルツ光照射、自由電子 1000 倍に」

(2) 京都新聞 (2012 年 1 月 10 日)「世界最高強度のテラヘルツ電磁波成功 京大グループ」

(3) 日刊工業新聞 (2012 年 2 月 15 日)「京大、テラヘルツ光で半導体中の自由電子を 1000 倍に」

(4) 朝日新聞 WEB (2012 年 2 月 15 日)

(6) 成果展開事例

① 実用化に向けての展開

- JST「A-STEP」事業に採択され、実施し、終了。課題名「高分解能テラヘルツ近接場顕微鏡の開発」(H22～24)

② 社会還元的な展開活動

- 小学生対象、高校生対象の科学体験セミナーで CREST 研究の一端を説明し、科学への興味を喚起できている。
- 中小企業を対象としたテラヘルツセミナーの講師を 2 回つとめた。
- 市民向けの講義を京都大学品川オフィスでおこなった。

§5 最後に

5年間にわたって研究を暖かく見守ってくださった領域代表の伊藤正先生をはじめアドバイザーの先生、JSTの担当の皆様には大変感謝しております。研究の見直しをフレキシブルに認めいただき、資金面で多大な応援をいただいた結果、最初の目標を上回る多くの成果を得ることができました。この成果は、スタッフ研究者、ポスドク、若い博士課程の学生の積極的な研究への参加なしには得られませんでした。ここに感謝いたします。

我々の切り開いた研究分野は、現在世界的に非常な勢いでひろがっています。そのなかで、このように最先端の研究成果を得られたのは、まさに時機を得たCREST研究のサポートがあったからです。最近はずぐに役にたつことを重視する側面がありますが、長期的視野にたつて、先端を果敢に切り開く基礎的な研究テーマへのサポートは非常に重要です。日本にCRESTのような研究費のシステムがあるのは日本の強みだと思います。今後とも基礎研究へのサポートををよろしくお願い申し上げます。

● OTST2013 国際会議での写真



● 空気プラズマテラヘルツ光源とテラヘルツ分光システム(矢印が空気プラズマ)

