

平成23年 5月27日現在

研究種目：学術創成研究費
 研究期間：2005～2009
 課題番号：17GS0209
 研究課題名（和文）THz 波高分解吸収スペクトラム測定による分子・格子の固有振動と分子構造の同定
 研究課題名（英文）Molecular structure and vibrational dynamics studied by Terahertz radiation spectroscopy
 研究代表者
 富永圭介（TOMINAGA KEISUKE）
 神戸大学・分子フォトサイエンス研究センター・教授
 研究者番号：30202203

研究成果の概要（和文）：電波と光の間に存在するテラヘルツ（THz）周波数帯は、分子間振動や高分子の運動など、分子科学において重要な周波数帯であるが、長年、「未踏の周波数帯」と呼ばれてきた。本研究では、量子エレクトロニクスと分子科学の研究者が有機的に連携することにより、THz 波分光装置を開発し、THz 帯に現れるバンドの同定を行なった。特に、高分解能測定により同位体シフトを精密に測定し、分子性結晶のバンドの同定に成功した。

研究成果の概要（英文）：The THz frequency region exists between the optical and microwave regions, where collective motions such as intermolecular motion in condensed phases have their spectral components. Despite the fact that understanding of molecular dynamics in the THz frequency region is important, this region has been referred to as unexplored frequency region. In this work researchers in quantum electronics and molecular science developed THz spectrometers and investigated the spectrum in the THz region together cooperatively. Especially, by observing isotope shifts in the molecular crystals by high-resolution measurements, we have succeeded in assigning the THz bands rigorously.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	101,600,000	30,480,000	132,080,000
2006年度	104,000,000	31,200,000	135,200,000
2007年度	102,100,000	30,630,000	132,730,000
2008年度	81,500,000	24,450,000	105,950,000
2009年度	69,300,000	20,790,000	90,090,000
総計	458,500,000	137,550,000	596,050,000

研究分野：物理化学

科研費の分科・細目：物理化学

キーワード：テラヘルツ、低振動スペクトル、密度汎関数法、水素結合性分子、表面・界面、分子欠陥

1. 研究開始当初の背景

(1) 1 テラヘルツ(THz)は約 33 cm^{-1} に相当し、THz波領域は光と電波の中間領域に位置する。このTHz帯の分光は古くから遠赤外分光と呼ばれ長い歴史がある。にもかかわらず、このエネルギー帯が「未踏の領域」と呼ばれてきた。その理由としては、(1)光源および検出器の能力が十分でなく、精度の高いスペクトル

測定が困難であった。(2)分子間相互作用や液体分子の集団運動など、理論的に解析する手法が未開発であり、たとえスペクトルが得られたとしてもそれから微視的な情報を得ることが困難であった。ここ 20 年、上記の二点について大きな進展があり、精度の高い THz スペクトル測定と高度な理論的解析が可能となってきた。

(2) 1 THz の振動数を持つ電磁波の周期は 1 ps であるため、この振動数領域のスペクトルには、時間領域でいうと、ピコ秒およびサブピコ秒の時間領域のダイナミクスに関する情報が含まれることになる。液体や高分子などの分子系について、この振動数領域に特徴的なスペクトルを持つ運動としては、以下のものが考えられる。すなわち、分子内の大振幅振動、分子会合体における分子間振動、ライブラクション(衝振)運動、速い回転緩和、高分子の低振動運動、会合性液体の集団運動などである。

(3) これらの運動に起因する THz 帯に表れるスペクトル成分の多くは、弱い分子間相互作用によるものである。生体分子の機能発現の機構では、分子間相互作用を多点で作用させ、それらの熱的な生成・解裂により、例えば、タンパク質の大きな構造変化などを引き起こす。また、自己会合や自己組織化なども弱い非共有結合を多点で作用させることによりそれを可能にしている。これは、強い共有結合の解裂、生成を伴う化学反応とは大きく異なるものである。このように THz 帯のスペクトルの解析は、「非共有結合の化学の基本」と呼ぶことができ、生体高分子の構造安定性や機能発現の解明、また自己組織化によるナノ材料の開発など、基盤的な情報を与えることができると考えられる。

2. 研究の目的

このような状況を踏まえ、本研究では、量子エレクトロニクスと分子科学の研究者が有機的に連携することにより、分子科学の目的にあった THz 波分光装置を開発し、THz 分子科学の創成を行うことを目的としている。

装置開発としては、結晶 GaP の格子振動を利用した THz 波分光装置や、フェムト秒パルスを用いた時系列測定法による THz 分光装置など、THz 波領域における先端的分光装置の開発を行う。また、それらを用いた測定実験により、THz 波領域における基礎的な分子科学を推進する。特に、液体・溶液や生体高分子、界面・表面など、凝縮相における測定を行い、THz 波領域のスペクトルが「分子について何がわかるのか」を明らかにし、「THz 分子科学」の創成を行う。将来的には、有機合成や無機合成、さらに理論化学の精鋭を結集し、THz 分子科学の発展を行う。

3. 研究の方法

本研究は、大きく分けて以下の 2 つの部分よりなり、互いが有機的に連携することによりテラヘルツ分子科学の創成をおこなう。

(1) 装置開発: THz 分子科学の創成に必須となる THz 波領域の分光装置の開発を行う。

(2) 測定実験とその解釈: それらの装置を用いた測定実験を行い、理論的な枠組みによる解

釈を行う。

4. 研究成果

(1) テラヘルツ光源と分光装置の開発

① GaP テラヘルツ波信号発生装置

分子振動解析のための THz 分光スペクトル測定装置の性能としては、広帯域・高分解能・高 S/N 比が求められ、更に高速測定と、低温試料測定を実施できることが望まれる。この実現のための THz 光源としては、広帯域・狭線幅・高出力・高安定性・高速掃引性が必要となるとともに、更に汎用展開には、操作・メンテナンスが容易であり、小型で安価であることが望まれる。GaP-THz 信号発生装置は、差周波発生原理に基づいており、いわば THz 帯波長可変レーザであるが、半導体 GaP 結晶の透明性のために広帯域で高強度な THz 波を発生することができ、従来必要とされた極低温動作検出器に替わって小型室温動作検出器のダブルビーム構成を採用することができるので、高操作性と安価が実現される。分解能は励起レーザの線幅に強く依存する。本研究では、この周波数分解能改善を追及し、3 世代の改良による分光スペクトル測定装置研究開発を実施した。

第 1 世代 [OPO (オプティカル・パラメトリック・オシレータ) 励起]: YAG レーザを波長固定、OPO を波長可変励起光源として、分解能 1.5GHz 程度の分光スペクトル測定装置を構成し、後述する測定スペクトルを得た。この OPO に半導体レーザを種光源とした光注入法を適用すると、シグナル光に対して構成する共振器に、アイドラ光に対応する赤外光を入射することができるので、高効率の光注入効果が得られ、線幅 300MHz を実現した。この時の周波数分解能の限界はレーザ光のパルス幅 6ns によるフーリエ限界によって制限されていた。波長掃引する場合に、共振器長に対応した出力変動が起こるので、これを避けるよう共振器長をアクティブに制御する機構を作製・適用した。

第 2 世代 [Cr:F (クロムドープ・フォルス テライトレーザ) 励起]: 1.2 μm 帯の波長可変レーザである Cr:F レーザの一方を波長固定、もう一方を波長可変として励起光とし、GaP-THz 信号発生装置を構成すると、線幅 500MHz が得られる。本研究の後半期に測定されたスペクトルは、主に本装置によって測定された。OPO に比較して、1/3 程度の安価なレーザで、安定した動作が可能であり、精密分光スペクトル測定が、一般普及に向けて実用段階となった装置であった。

第 3 世代 [LD (レーザダイオード) 励起]: 1.0 μm 帯の連続波波長可変半導体レーザ 2 台を励起光源として、GaP-THz 信号発生装置を構成した。LD の出力はファイバーアンプで増幅されてから GaP 結晶に導入されるが、フ

アイバで導波されるため装置配置の自由度が高く、安定性が高い。レーザ周波数の変動を抑えるために、周波数安定化に関する研究開発を行った。本方式の優れている点は、容易に THz 周波数の絶対精度が得られることである。通常、周波数絶対精度を測定することは絶対基準が必要となるために煩雑・高価になるが、差周波発生であるために、周波数測定の相対精度が絶対精度に対応するので、分光スペクトル測定時に、同時に2波長を測定することから実現できる。操作が容易で高安定なため、ほぼメンテナンスフリーであり、ターンキーシステムとして利用できる、一般普及型としての条件を満たす装置となった。図1に、例としてこの分光装置を用いて測定した、減圧水蒸気の吸収スペクトルを示す。

周波数基準を別途用意することなく、絶対精度の高いスペクトル測定が容易に行えるようになった。本研究の当初目標100MHz以下に対して、1桁下の約10MHzが得られていることがわかる。

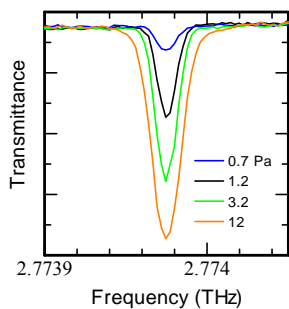


図1 GaP THz分光スペクトル測定装置による減圧水蒸気の吸収スペクトル

②超短パルスレーザーによるテラヘルツ波分光装置

増幅デバイス材料候補を探すにあたって、光パラメトリックデバイスに複屈折性を持つ物質が不可欠であることを考えると、複屈折性物質は有力な材料候補である。 β -BaB₂O₄(BBO)は、複屈折性物質の1つであり、3.5 μ mまで透過することが知られている。これらの性質からBBO結晶はTHz領域において、光パラメトリック増幅あるいは発振材料になると考えられる。そこで、0.1~1.1 THzにおけるBBO結晶の光学的性質を調べた。具体的には、様々な方位角において、BBO結晶にTHz波を照射してその透過スペクトルを測定し、透過率の方位角依存性を調べた。

THz波は、繰り返し周波数 80 MHz、波長 800 nm、パルス幅 100 fsのTi:Sapphire(Ti:S)レーザーを 1 Tの磁場中に置いたInAsに照射することで発生させる。また、波長 800 nmのTi:SレーザーをBBO結晶に照射し、透過スペクトルの方位角依存性を比較する。BBO結晶のスペクトルからは特異な複屈折性が見られ、吸収中心は0.65 THzであった。このTHz帯吸収には低波数フォノンの関与が考えられ、第一

原理計算を基にした格子力学計算によると、[B₃O₆]³⁻リング間の振動によることが明らかとなった。また、様々な方位角におけるBBO結晶のTHz波透過スペクトルを測定した。その結果、0.65 THzにおいて、顕著な方位角依存性を見出した。これは、第一原理計算に基づく計算結果とも一致した。また、 $\Delta n/n=0.118$ であった。そして、これらの吸収特性は、低周波数の[B₃O₆]³⁻のフォノンモードによることを明らかにした。以上から、BBO結晶を用いたTHz波光学的パラメトリック発振の実現可能性を示した。BBO結晶については、複屈折性の高さからTHz領域におけるパラメトリック増幅・発振デバイスとなりうることを示した。

また、BBO結晶以外の光強度 THz 放射源を探索するため、GaAs/AlGaAs量子ドットからの THz 波の放射出力とスペクトル測定を室温下において行った。サンプル表面に対して入射角 45°でチタンサファイアレーザーを入射し、反射角 45°方向に放射された THz 波をパラボラミラーで集光した。鉛直方向上向きと下向きの極性を持つ 1T の外部磁場下と磁場を印加しない 3 パターンで THz 波出力、スペクトルをそれぞれのサンプルで計測した。本実験結果よりフェムト秒レーザーパルス入射による MBE 結晶成長を用いた単層、多層 InAs/GaAs 量子ドット構造からの高強度の THz 放射が確認できた。さらに、多層量子ドットサンプルからの THz 放射出力と単層量子ドットサンプルからの THz 放射出力を比較すると多層量子ドット構造によるものがより高い出力を示すということが分かった。多層量子ドットサンプルからの THz 放射出力は外部磁場印加なし、弱励起フルーエンスの状態で現在最も高強度の THz 放射光源である p 型 InAs サンプルからの出力の約 70%の値を示すことが分かった。

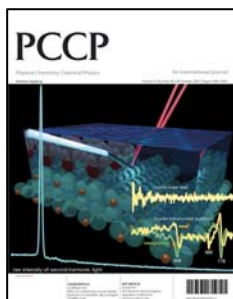
さらに、これらの実験を通してマイケルソン干渉計と液体ヘリウム冷却の Si ボロメーターを組み合わせた THz 分光装置を開発した。この分光装置は 3THz 近い周波数領域を一度に分光することができ、THz 領域における物質の光学特性を調べるにあたって十分な性能を持つことが示された。

③表面・界面特異的テラヘルツ波分光装置

【界面選択的ラマン分光法】界面選択性をもつラマン分光法（四次ラマン分光法）を用いて界面に局在する THz 振動を計測することに絞って研究をすすめた。四次ラマン分光法は①時間幅 18 fs の波長可変光パルスを用いてラマン励起した振動コヒーレンスを②プローブ光の第二高調波に現れる量子ビートとして検出する分光法である。ポンプ-プローブ過程全体の次数が 4（偶数）となる光学遷移を選んだことによって反転対称が破れた界面近傍だけを観測できる。分担者らは気体

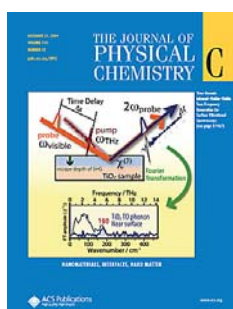
-液体界面の計測に世界で初めて成功し、本研究において多種多様な界面へ応用しうる分光装置の開発と測定をおこなった。

本手法を用いて気体-固体界面・液体-液体界面・液体-固体の計測に成功した。さらに固体表面に吸着した分子の振動モードをこの手法によって初めて検出した。また、入射光の偏光方向と方位角を系統的に変化させた実験をおこなって、TiO₂表面近傍THz振動をラマン励起する光学過程の選択律を明らかにした。これら本研究の成果によって、四次ラマン分光法は媒質に埋没した界面の分析に有効な手法であることを示した。



【THz和周波分光器】THz

電磁波によって励起した格子振動コヒーレンスを、プローブ光の反射波または第二高調波を用いて検出するTHz和周波分光器を設計製作した。本手法を用いて、ZnO結晶およびTiO₂結晶に対して三次の時間領域THz-可視-可視の



和周波信号を測定し、和周波信号の入射光方位依存性にもとづいて、THz振動スペクトルを帰属した。三次（奇数次）の光学過程を利用しても、信号光の波長を適切に選択すれば表面近傍数 nmのTHz振動スペクトルを測定できることを示した。

④光ポンプテラヘルツプローブ(OPTP)分光装置

OPTP 分光装置をチタンサファイアレーザーの増幅器からの出力を用いて製作した。出力の一部で ZnTe で光整流により THz 波を発生と電気光学効果を用いた検出を行ない、残りの出力で試料のポンプを行った。この装置を用いて種々の無機半導体のキャリアダイナミクスの観測を行い、Ge, Si では寿命が 1 ns 以上であるが、GaAs, ZnSe では寿命が 100~300ps であることがわかった。これはバンド構造を反映している。OPTP 分光はこれまで基底電子状態に限られてきた THz 分光を励起状態の研究、すなわち光化学への展開を可能にするものである、今後大いにその発展が期待される。

(2) 測定実験とその解釈

①水素結合性結晶の振動モードの同定

多くの水素結合性の分子は固体結晶においてTHz帯に複数の振動バンドを示す。それらのバンドに対して近年量子化学計算を用い

て単位格子を考慮した計算などが行なわれているが、振動モードの同定は決して十分なレベルにあるとはいえない。我々は分子性結晶のTHz帯のバンドを厳密に同定することに成功した。我々が用いた手法は以下の通りである。

1. $v=0 \rightarrow v=1$ 遷移だけを観測するために、極低温測定(5 K 等)を行なう。
2. 同位体シフトを観測する。これは中赤外領域の振動分光にてバンドの同定で行なわれてきた手法である。
3. 結晶構造の周期性を取り入れた密度汎関数法を用いて、同位体置換された分子と通常分子(H体)について構造最適化と基準振動解析を行ない、振動モードの振動数と同位体シフトを求める。X線回折実験から求めた構造を入力し、構造最適化を行なう。その結果、最終的な構造が最初に入力したものとそれほど異なることを確認する。計算にはCRYSTAL06コードを用いた。

2-フランカルボン酸の透過スペクトルの結果を示す。d1 は、カルボキシル基の、d3 は五員環の、d4 は全てのH原子をD原子にかえたものであり、d0は無置換体である。測定では、4つの振動バンドが観測されており(78cm⁻¹のものはポリエチレンからの信号)、全てにおいて同位体シフトが観測された。CRYSTAL06により得られた計算結果は、振動数だけでなく、同位体シフトも計算は実験をよく再現している。ここで、同位体シフトの計算が、実験値より大きい場合は、その水素原子の基準振動に及ぼす寄与を大きく見積もりすぎていること、小さい場合はその逆のケースであることを示しており、同位体シフトから基準振動モードに関する詳細な知見を得ることができる。

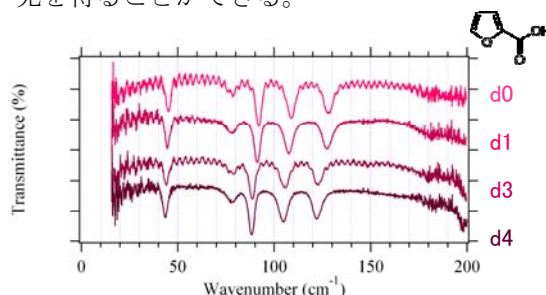


図2. 2-フランカルボン酸とその重水素置換体の5 KにおけるTHzスペクトル。

また、アントラセンについても重水素置換体(C₁₄D₁₀)との比較を実験、計算ともに行い、振動バンドの厳密な同定を行なった。低振動モードにはほぼ純粋な分子間振動と分子間振動と分子内振動が混合した二種類の振動があり、それを同位体シフトから明確に見分けることができた。また、correlation-field分裂による二つのバンドも明確に観測することができた。特に、同位体シフトと孤立系の

密度汎関数法による計算結果との比較から、結晶の周期構造を考慮した計算を行わなくても振動バンドの同定が可能であることを示した。このような同位体シフトに注目したTHz帯の振動バンドの同定は世界初であり、高分解能測定によりそれが可能になった。

②タンパク質の低振動運動と機能発現：タンパク質の機能発現にはタンパク構造の大きな変化を伴うものがあり、この構造変化は多くの原子が集团的に運動することにより起こる。タンパク質のこのような運動は低振動数領域に特徴的な振動数を持つことが多い。また、タンパク質が機能を発現する際、タンパク質の中に取りこまれている水分子や周辺の水分子が重要な役割を演じていることが知られている。本研究では、THz時間領域分光法を用いて、異なる水和状態、および温度でバクテリオロドプシン (BR) の低振動スペクトルを測定し、BRの低振動スペクトルが水和、温度により受ける影響を調べ、さらに機能発現との関連について考察した。

換算吸収断面積(Reduced Absorption Cross Section; RACS)を吸光係数と屈折率の積で定義した。今回の測定からBRのRACSを求めたところ、全ての水和状態および温度でRACSの振動数のべき依存性が見られた。7~26 cm^{-1} の振動数領域で指数 α の値を求めたところ、常温では、乾燥試料で $\alpha = 1.97$ となり、この値は水和量の増加とともに小さくなる傾向にある。赤外活性度が波数に依存しないと仮定すると、RACSは振動状態密度に比例する。このモデルと比較すると、BRの低振動ダイナミクスは水和量の増加に伴い非調和性が増加することを示している。この非調和性の増加は単にBRに水和したバルク的な水分子によるものではなく、水和によるBRの低振動モードの変化や、BRの近くに存在する水分子によるものだと考えている。また、べき数の温度依存性は、-100°C~0°Cの温度領域で乾燥試料は、ほぼ2に近い値を取り、この温度領域で乾燥試料の低振動モードは調和的に振舞っていることを示す。一方、水和試料では-100°C~-40°Cでは、乾燥試料と同様であり、 α の値はほとんど温度変化を示さないが、-40°Cより高温領域では、 α の値は2より小さくなり、温度変化に伴う減少を示す。このことは、水和したBRの低振動ダイナミクスは-40°C以上で、温度上昇に伴い非調和性が急激に増加することを示している。一方、非弾性中性子散乱を用いたBRの測定から、230K付近で水和試料の平均二乗変位が急激に増加する動力学的遷移が起こることが報告されている。今回、THz時間領域分光法により低振動モードの非調和性を調べることが可能である。観測されたこの急激な変化も、動力学的遷移によるものであり、THz分光により非弾性中性子散乱とTHz分光は異なる低振動

運動を観測することができることから、両者の比較により機能発現に重要な非調和性についての知見を得ることができると考えている。

その他、イオン液体(メタロセン系)のTHzスペクトルを時間領域分光法で観測し、イオン液体の低振動モードがイオン間の分子間相互作用のため、通常の液体と大きく異なり、衝振運動などのバンドが現れることを示した。また、タンパク質等の高分子とアミノ酸などの小さな単分子のTHzスペクトルの関連を調べるため、アラニンやグリシンの二量体から六量体までのスペクトルを観測し、スペクトルの強度やべき依存性が系統的に変化することを見出した。

③分子欠陥の検出：本研究で開発したGaP-THz分光スペクトル装置の高精度・高分解能を用いて、有機分子の構造欠陥を検出できることを示した。グルコース結晶に放射線を照射すると、分子欠陥の影響は吸収周波数のシフトとして観測できることを見出した。THz波を用いた分子の構造欠陥検出の成功は、世界初である。この結果は、薬剤の工程検査や麻薬類の産地特定に発展すると考えられ、実際に医療用市販薬剤等に適用すると、水和・酸化・不純物混入などによって、吸収周波数のシフトが頻繁に見られることがわかるなど、今後THz波の特徴的な応用範囲を広げる結果になった。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 39 件)

- (1) A. Chakraborty, T. Inagaki, M. Banno, T. Mochida, K. Tominaga, "Low-frequency spectra of metallocenium ionic liquids studied by terahertz time-domain spectroscopy", *J. Phys. Chem. A* **115**, 1313 (2011). 査読有
- (2) O. Kambara, K. Tominaga, J. Nishizawa, T. Sasaki, H.-W. Wang, M. Hayashi, "Mode assignment of vibrational bands of 2-furoic acid in the terahertz frequency region", *Chem. Phys. Lett.* **498**, 86 (2010). 査読有
- (3) S. Kawaguchi, O. Kambara, M. Shibata, H. Kandori, K. Tominaga, "Low-Frequency Dynamics of Bacteriorhodopsin Studied by Terahertz Time-Domain Spectroscopy (invited)", *Phys. Chem. Chem. Phys. themed issue: Water in Biological Systems*, **12**, 10255 (2010). 査読有
- (5) C. S. Ponseca Jr, O. Kambara, S. Kawaguchi, K. Yamamoto, K. Tominaga, "Low-frequency spectra of amino acids and short peptides studied by terahertz time-domain spectroscopy", *J. Infrared Milli. Terahz. Waves* **31**, 799 (2010). 査読有
- (6) T. Nomoto, H. Onishi, "Time-Domain Infrared-Visible-Visible Sum-Frequency Generation for Surface Vibrational

Spectroscopy”, *J. Phys. Chem. C (Letter)* **113**, 21467 (2009). 査読有

(7) C. S. Ponseca, Jr., E. Estacio, S. Ono(6 番目), N. Sarukura(8 番目), (他 7 名), “Transmission characteristics of lens-duct and photonic crystal waveguides in the terahertz region”, *J. Opt. Soc. Am. B* **26**, A95 (2009). 査読有

(8) E. Estacio, M. H. Pham, S. Takatori, N. Sarukura(7 番目), (他 9 名), “Strong enhancement of terahertz emission from GaAs in InAs/GaAs quantum dot structure”, *Appl. Phys. Lett.* **94**, 232104, (2009). 査読有

(9) S. Saito, E. Estacio, T. Nakazato, Y. Furukawa, T. Shimizu, N. Sarukura(6 番目), (他 5 名), “Observation of birefringence in BBO crystals in the terahertz region”, *J. Crystal Growth* **311**, 895, (2009). 査読有

(10) J. Nishizawa, T. Sasaki, K. Suto, M. Ito, T. Yoshida, T. Tanabe, “High-resolution GaP Terahertz Spectrometer and Its Application to Detect Defects in gamma-irradiated Glucose Crystal”, *Int. J. Infrared Milli. Terahz. Waves* **29**, 291 (2008). 査読有

(11) J. Nishizawa, T. Sasaki, Y. Oyama, T. Tanabe, “Aspects of Point Defects in Coherent Terahertz-Wave Spectroscopy”, *Physica B: Condensed Matter* **401-402**, 677 (2008). 査読有

(12) J. Nishizawa, T. Sasaki, T. Tanno, “Coherent terahertz-wave generation from semiconductors and its applications in biological sciences”, *J. Phys. Chem. Sol.* **69**, 693 (2008). 査読有

(13) E. Estacio, N. Sarukura(2 番目), C. Ponseca Jr., (他 4 名), “Transverse magnetic field polarity effects on the terahertz radiation from GaAs/AlGaAs modulation-doped hetero-structures with varying AlGaAs spacer-layer thickness”, *J. Appl. Phys.* **104**, 073506 (2008). 査読有,

(14) T. Nomoto, H. Onishi, “Fourth-order Coherent Raman Spectroscopy in a Time Domain: Applications to Buried Interfaces (invited)”, *Phys. Chem. Chem. Phys. (Perspective)* **9**, 5515 (2007). 査読有

(15) J. Nishizawa, K. Suto, T. Sasaki, T. Tanabe, T. Tanno, Y. Oyama, F. Sato, “GaP Raman Terahertz high accuracy spectrometer and its application to detect organic and inorganic crystalline defects”, *Proc. Jpn. Acad, Ser. B*, **82**, 353 (2006). 査読有

[学会発表] (計 95 件)

(1) K. Tominaga, “Temperature dependent low-frequency spectra of proteins and polypeptides studied by terahertz time-domain spectroscopy (plenary)”, *2nd International THz-Bio Workshop*, Seoul, January 20 (2011).

(2) K. Tominaga, “THz-TDS Studies on Proteins and Molecular Complexes in Solutions (invited keynote talk)”, *34th IRMMW -THz 2009*, Busan,

September 21 (2009).

[図書] (計 0 件)

[その他]

新聞報道

読売新聞 平成 18 年 12 月 13 日付 「テラヘルツ波照射新装置」

ホームページ等

富永圭介、

<http://www2.kobe-u.ac.jp/~tominaga/>

佐々木哲朗

<http://hanken.cc.sophia.ac.jp/index.htm>

大西洋

<http://www.edu.kobe-u.ac.jp/sci-onishi/>

猿倉信彦

<http://www.ile.osaka-u.ac.jp/research/iam/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

富永 圭介 (TOMINAGA KEISUKE)

神戸大学・分子フォトサイエンス研究センター・教授

研究者番号 : 30202203

(2) 研究分担者

佐々木 哲朗 (SASAKI TESTUO)

上智大学・半導体研究所・准教授

研究者番号 : 20321630

大西 洋 (ONISHI HIROSHI)

神戸大学・理学研究科・教授

研究者番号 : 20213803

猿倉 信彦 (SARUKURA NOBUHIKO)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・教授

研究者番号 : 40260202

神取 秀樹 (KANDORI HIDEKI)

名古屋工業大学・工学研究科・教授

研究者番号 : 70202033

持田 智行 (MOCHIDA TOMOYUKI)

神戸大学・理学研究科・教授

研究者番号 : 30280580

小野 晋吾 (ONO SHINGO)

名古屋工業大学・工学研究科・准教授

研究者番号 : 40370126