

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年5月31日現在

機関番号：16101
 研究種目：挑戦的萌芽研究
 研究期間：2011～2012
 課題番号：23656265
 研究課題名（和文）高機能車載センシングのための物質識別型テラヘルツ分光レーダーの開発
 研究課題名（英文）Object recognizing terahertz spectral radar for advanced automobile sensing
 研究代表者
 安井 武史（YASUI TAKESHI）
 徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・教授
 研究者番号：70314408

研究成果の概要（和文）：パルス状 THz 波を用いた次世代車載レーダー技術として、THz インパルスレーダーと THz 分光レーダーに関する研究開発を行った。THz インパルスレーダーでは、測定レート 10Hz で、1mm 以下の測距性能を達成し、移動ターゲットのリアルタイム測定が可能であることを確認した。一方、THz 分光レーダーでは、測定対象の吸収特性による THz 反射スペクトル変化は確認されなかったが、表面粗さに依存した反射分光スペクトルが確認され、表面粗さを利用した物質識別の可能性が示唆された。

研究成果の概要（英文）：We developed THz impulse radar and THz spectral radar for advanced automobile radar. THz impulse radar achieved a distance resolution below 1 mm at a scan rate of 10 Hz, enabling us to monitor moving target in real time. On the other hand, THz spectral radar implied a possibility of object recognition based on THz scattering spectrum because the spectrum varies depending on the surface roughness of the object under test.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：応用光学・量子光工学、計測工学、テラヘルツ/赤外材料・素子、リモートセンシング、レーダー

1. 研究開始当初の背景

車載レーダー技術は、前方車両との距離・速度の検知によるクルーズコントロールや衝突不可避時のドライバーへの被害軽減など、安全な車社会を創出する上で重要な役割を担っているが、今後の高齢化社会において急増すると考えられる高齢者ドライバーの運転補助という観点で、車載レーダーのさらなる高機能化・高度化が切実に求められている。

これまでに、光波（近赤外光）を用いたレーザーレーダー方式や電波（ミリ波）を用い

たミリ波レーダー方式が実用化されている。レーザーレーダー方式は指向性の鋭いレーザー光を用いて高精度な測距が可能であるが、雨・雪・霧による散乱減衰の影響を受け易い。一方、ミリ波レーダー方式は雨・雪・霧などの悪天候下においても前方の車両を検知できるが、高精度な測距は困難であった。さらに、これらの従来法は測定対象までの距離や速度に関する情報は与えるものの、測定対象（ヒト、車、電柱、木など）を識別することは不可能であった。従って、一長一短を有する両レーダー方式の長所を融合すると

同時に、測定対象の識別までも可能なレーダーが実現できれば、前方物体の検知によるクルーズコントロールや衝突不可避時のドライバーへの被害軽減において、測定対象に応じてフレキシブルかつインテリジェントに対応することが可能になり、理想的な車載センシングが可能になる。

2. 研究の目的

本研究では、まず、電波と光波の境界に位置し両者の性質を併せ持つパルス状テラヘルツ波 (THz パルス) をレーダー波として用いることにより、従来レーダー方式 (近赤外レーザーレーダー、ミリ波レーダー) の短所を補い長所を融合して測距性能を高精度化することを試みる (THz インパルスレーダー)。更に、車載レーダーの高機能化を実現するため、THz 領域において各種物質が特徴的な吸収・散乱スペクトル (THz 指紋スペクトル) を示すことに着目し、それに基づいた分光学的物質分析により測定対象の識別が可能な物質識別型 THz 分光レーダー技術の開発を行う。

3. 研究の方法

(a)非同期光サンプリング式 THz パルス計測法

モード同期周波数がわずかに異なるように制御された2台の独立したフェムト秒レーザー (モード同期周波数= f_1, f_2 ; モード同

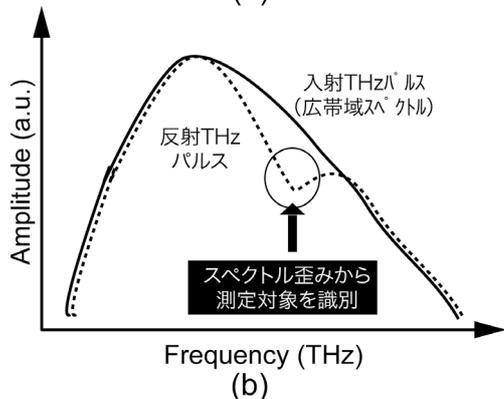
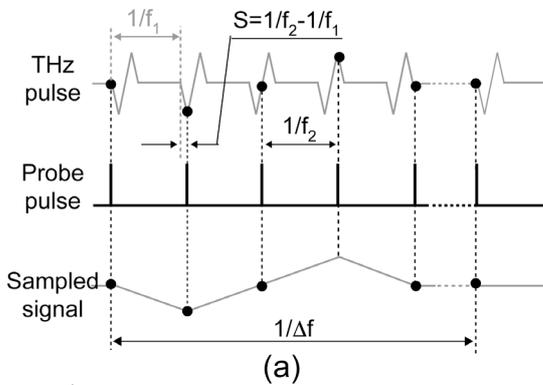


図1 (a)非同期光サンプリング法と(b)テラヘルツ分光による物質識別。

期周波数差= $Df = f_1 - f_2$) を THz パルスの発生 (ポンプ光) 及び検出 (プローブ光) にそれぞれ用いると、THz パルスとポンプ光のパルス周期がわずかに異なるので、THz パルスとプローブ光が THz 検出素子で時間的に重なるタイミングがパルス毎に自動的にずれながらサンプリング測定されることになる [図1(a)]。その結果、ps オーダーの超高速時間波形 (周期= $1/f_1$) が μ s オーダーの低速時間時間波形 (周期= $1/Df$) まで時間的に拡大されることになり [時間スケール拡大率= $(1/Df)/(1/f_1)=f_1/Df$]、機械式時間遅延走査を用いなくとも、汎用オシロスコープで実時間測定 (測定周期は $1/Df$) が可能になる。測定時間短縮を阻害していた機械式時間遅延走査ステージの排除により、移動物体を実時間計測することが可能になる。

(b) THz 時間領域分光法 (THz-TDS) による物質識別

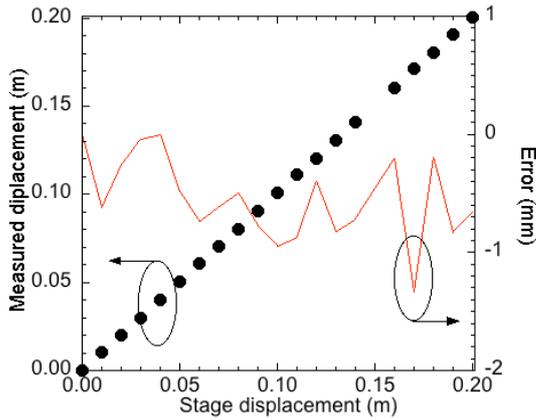
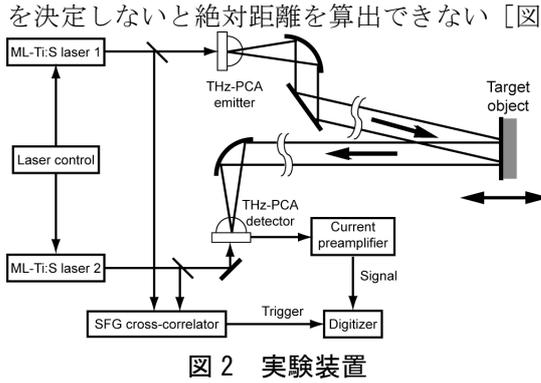
測定された THz パルスの電場時間波形を、フーリエ変換することによって得られたスペクトル波形に基づいて分光分析を行う手法を、THz-TDS という。反射 THz パルスのスペクトル波形は、測定対象の反射分光特性や散乱分光特性に依存して歪むと考えられる [図1(b)]。そのスペクトル波形の歪みから、測定対象の物質材料や表面荒さが推定できるので、これらの情報に基づいて物質分析を行う。

4. 研究成果

(a)非同期光サンプリング式 THz パルス計測法

従来の THz パルス計測では、機械式時間遅延走査に起因する長い測定時間や遠隔リモート計測の制限のため、現実的なレーダーとしての利用が困難であった。本研究では、機械式時間遅延走査が不要な非同期光サンプリング法を THz インパルスレーダーに適用することにより、THz レーダー技術の実時間化と遠隔リモート計測化を試みた。図2は実験装置を示しており、測定レートは毎秒10回である。1m先に設置された測定ターゲット (アルミ板) を機械式ステージで連続的に遠ざけていったときの、移動変位量と測定変位量の関係を図3に示す。移動変位量と測定変位量の間には良好な線形関係が得られていることが分かる。両者の測定誤差 (図3右側垂直軸) の平均値から、相対的な測距精度は移動距離20cmに対して 550μ m であった。

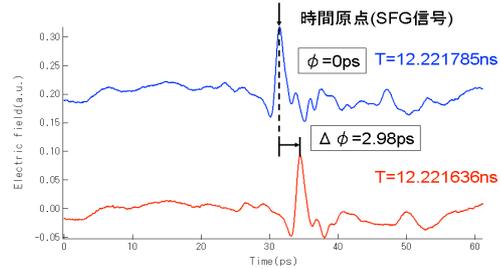
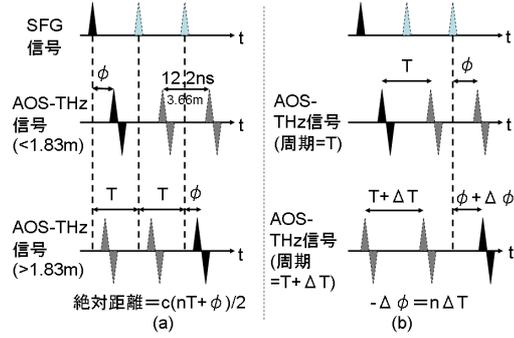
THz インパルスレーダーでは時間原点 SFG (和周波発生光) 信号に対する THz パルス (AOS-THz 信号) の時間遅れ (t) から絶対距離を決定するが、ターゲット距離が THz パルスの空間周期 (=パルス周期 T * 光速 c) の半分 (モード同期周波数 81.8MHz の場合、1.83m) を上回る場合には、測定 THz パルスの次数 (n)



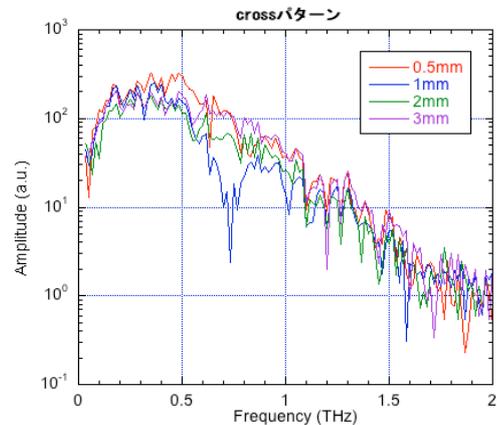
4(a)]. 今回、この次数決定のための手法を提案し、その原理確認を行った。測定原理を図4(b)に示す。フェムト秒レーザーのパルス周期は任意の値に設定可能であるので、パルス周期をDTだけ変化させた場合の時間遅れ変化量をDfとすると、両者には $Df = -nDT$ の関係が成り立つ。したがって、DTとDfを測定することにより、次数が決定できる。図5は、測定ターゲットを3.662mの位置に配置し、パルス周期を12.221785nsから12.221636nsに変化させた場合(DT = -1.49ps)のTHzパルス波形を示している。Df = 2.98psであるので、次数nは2となり、ターゲット距離は3.662mとなる。

(b) THz 時間領域分光法 (THz-TDS) による物質識別

最後に、物質識別型レーダーとしてTHz分光センシングが利用可能性を検討した。まず、自動車関連材料のTHz分光特性を透過配置で計測し、各種材料の吸収係数、屈折率、反射率の各スペクトルを算出した。その結果、スペクトル特性は材料間で異なったものの、物質識別可能な特徴的スペクトル形状 (THz 指紋スペクトル) は確認されなかった。一般に、固体物体におけるTHz指紋スペクトルは、結晶性構造物質のフォノン吸収に由来するものが多いとされている。一方、今回測定したサンプルはいずれも特徴的な結晶構造を有していないため、THz指紋スペクトルを示さなかったと考えられる。



一方、車載センシングの識別対象 (ヒト、電柱、木、車など) は、材質以外に、それぞれ特徴的な表面粗さを有している。したがって、サンプルにTHz波を照射した場合、サンプル表面粗さがTHz波長オーダーであるならば、その散乱スペクトルが表面粗さ (すなわち測定対象) に依存して変化すると考えられる。幸いにも、材料自身のTHz分光特性はTHz反射スペクトルの形状にはほとんど影響を与えないので、THz散乱特性をスペクトル形状から抽出することが可能と考えられる。そこで、アルミ材にサイズの異なる周期構造 (ピッチサイズ: 0.5mm, 1mm, 2mm, 3mm) を加工し、その反射スペクトルを計測・比較したところ、特徴的なスペクトル・ディップが観測された (図6)。これは、表面粗さ形状の違いによる物質識別センシングの可能性を示唆している。



5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① Y.-D. Hsieh, Y. Iyonaga, Y. Sakaguchi, S. Yokoyama, H. Inaba, K. Minoshima, F. Hindle, Y. Takahashi, M. Yoshimura, Y. Mori, T. Araki, and T. Yasui, "Terahertz comb spectroscopy traceable to microwave frequency standard", IEEE Tran. Terahertz Sci. Tech., 査読有, Vol. 3, Iss. 3, pp. 322-300 (2013).
DOI: 10.1109/ TTHZ. 2013. 2250333
- ② M. Jewariya, E. Abraham, T. Kitaguchi, Y. Ohgi, M. Minami, T. Araki, and T. Yasui, "Fast three-dimensional terahertz computed tomography using real-time line projection of intense terahertz pulse", Opt. Express, 査読有, Vol. 21, Iss. 2, pp. 2423-2433 (2013).
DOI: 10.1364/ OE. 21. 002423
- ③ T. Yasui, M. Jewariya, T. Yasuda, M. Schirmer, T. Araki, and E. Abraham, "Real-time two-dimensional spatiotemporal terahertz imaging based on noncollinear free-space electrooptic sampling and application to functional terahertz imaging of moving object", IEEE-JSTQE, 査読有, Vol. 19, Iss. 1, art. 8600110 (2013).
DOI: 10.1109/ JSTQE. 2012. 2210393
- ④ 弥永祐樹, 謝宜達, 坂口良幸, 横山修子, 稲場肇, 美濃島薫, 荒木勉, 安井武史, "テラヘルツ周波数コムを観測と分光計測への応用", レーザー研究, 査読有, Vol. 40, No. 7, pp. 513-516 (2012).
- ⑤ T. Yasui, K. Kawamoto, Y.-D. Hsieh, Y. Sakaguchi, M. Jewariya, H. Inaba, K. Minoshima, F. Hindle, and T. Araki, "Enhancement of spectral resolution and accuracy in asynchronous-optical-sampling terahertz time-domain spectroscopy for low-pressure gas-phase analysis", Opt. Express, 査読有, Vol. 20, Iss. 14, pp. 15071-15078 (2012).
DOI: 10.1364/ OE. 20. 015071
- ⑥ 安井武史, 謝宜達, 弥永祐樹, 坂口良幸, 横山修子, 稲場肇, 美濃島薫, 荒木勉, "ギャップレスなテラヘルツ周波数コム生成と低圧ガス分光への応用", 光学, 査読有, Vol. 41, No. 9, pp. 485-489

(2012).

- ⑦ 安井武史, "テラヘルツ・カラーチャンネル", OplusE, 査読無, Vol. 34, No. 4, pp. 334-338 (2012).
- ⑧ 安井武史, "テラヘルツ帯周波数コム発生と応用", 応用物理, 査読無, Vol. 81, No. 4, pp. 308-311 (2012).

[学会発表] (計 29 件)

- ① 謝宜達, 弥永祐樹, 澤田陽介, 荒木勉, 安井武史, "光ファイバーベース非同期光サンプリング式 THz 時間領域分光法 (VIII) ~光ファイバー結合型光伝導アンテナによるオールファイバー化~", 第60回応用物理学関係連合講演会, 2013/03/03-03/29, 神奈川大学(横浜市).
- ② 中村翔太, 谷池亮人, 安井武史, "テラヘルツ・パルス・エコー法を用いた塗装膜の非接触リモート計測", 第28回塗料・塗装研究発表会, 2013/3/7, 工学院大学新宿キャンパス(東京都).
- ③ (招待講演) 安井武史, "ギャップレス THz コム分光法", レーザー学会学術講演会第33回年次大会シンポジウム「周波数コム光源とその計測応用への進展」, 2013/1/28, 姫路商工会議所(姫路市).
- ④ (招待講演) 安井武史, "テラヘルツ膜厚計について", 日本防錆技術協会関西支部講演会, 2012/11/29, 大阪市難波生涯学習センター(大阪市).
- ⑤ (招待講演) T. Yasui, Y.-D. Hsieh, and M. Jewariya, "Gapless terahertz comb spectroscopy based on frequency-swept dual comb technique", International Symposium on Frontiers in THz Technology (FTT 2012), 2012/11/28, 東大寺総合文化センター(奈良市).
- ⑥ Y. Iyonaga, Y.-D. Hsieh, Y. Sakaguchi, H. Inaba, K. Minoshima, F. Hindle, T. Araki, and T. Yasui, "Frequency-swept, asynchronous-optical-sampling terahertz time domain spectroscopy", International Symposium on Frontiers in THz Technology (FTT 2012), 2012/11/28, 東大寺総合文化センター(奈良市).
- ⑦ M. Jewariya, Y. Ohgi, E. Abraham, T. Araki, and T. Yasui, "Three-dimensional terahertz computed tomography based on real-time line projection of terahertz beam", International Symposium on Frontiers in THz Technology (FTT 2012), 2012/11/28, 東大寺総合文化センター(奈良市).
- ⑧ (招待講演) T. Yasui, "Terahertz comb spectroscopy", Laser and Tera-Hertz

- Science and Technology (LTST: OSA Topical Meeting), 2012/11/2, Wuhan National Laboratory for Optoelectronics (中国・武漢) .
- ⑨ 安井武史, 弥永祐樹, 荒木勉, 橋本守, "フーリエ変換型分光法におけるスペクトル分解能とスペクトル確度の向上 ~THz時間領域分光法における原理確認~, 日本分光学会テラヘルツ分光部会シンポジウム「テラヘルツ分光法の最先端VI~ここまできたテラヘルツ時間領域分光」, 2012/10/25, 筑波大学(つくば市) .
- ⑩ 謝宜達, 弥永祐樹, 坂口良幸, 横山修子, 稲場肇, 美濃島薫, フランシス・ヒンドル, 荒木勉, 安井武史, "ギャップレスTHzコム分光法の開発", Optics & Photonics Japan 2012, 2012/10/23, タワーホール船堀(東京都) .
- ⑪ 弥永祐樹, 謝宜達, 坂口良幸, 横山修子, 稲場肇, 美濃島薫, フランシス・ヒンドル, 橋本守, 荒木勉, 安井武史, "周波数走査型非同期光サンプリング式テラヘルツ時間領域分光法", Optics & Photonics Japan 2012, 2012/10/23, タワーホール船堀(東京都) .
- ⑫ (招待講演)安井武史, "テラヘルツ帯周波数コムの発生と応用", 戦略的基盤技術検討委員会, 2012/10/5, 島津製作所(京都市) .
- ⑬ T. Yasui, Y. Iyonaga, Y.-D. Hsieh, Y. Sakaguchi, S. Yokoyama, H. Inaba, K. Minoshima, and T. Araki, "Frequency-swept asynchronous-optical-sampling THz time-domain spectroscopy", 37th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz2012), 2012/9/27, University of Wollongong (オーストラリア) .
- ⑭ T. Yasui, Y.-D. Hsieh, Y. Iyonaga, Y. Sakaguchi, S. Yokoyama, H. Inaba, K. Minoshima, and T. Araki, "Generation of gapless terahertz frequency comb," 37th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz2012), 2012/9/27, University of Wollongong (オーストラリア) .
- ⑮ M. Jewariya, Y. Ohgi, E. Abraham, T. Araki, and T. Yasui, "Three-dimensional imaging of internal structure using line-field terahertz computed tomography" 第72回応用物理学学会学術講演会, 2012/9/13, 愛媛大学(松山市) .
- ⑯ Y.-D. Hsieh, Y. Iyonaga, Y. Sakaguchi, S. Yokoyama, H. Inaba, K. Minoshima, T. Araki, F. Hindle, and T. Yasui, "Application of gapless terahertz frequency comb for gas spectroscopy", 第72回応用物理学学会学術講演会, 2012/9/13, 愛媛大学(松山市) .
- ⑰ 弥永祐樹, 謝宜達, 坂口良幸, 横山修子, 稲場肇, 美濃島薫, フランシス・ヒンドル, 橋本守, 荒木勉, 安井武史, "光ファイバーベース非同期光サンプリング式THz時間領域分光法(VII) ~モード同期周波数走査によるスペクトル分解能の向上~, 第72回応用物理学学会学術講演会, 2012/9/11, 愛媛大学(松山市) .
- ⑱ 北口貴之, ジェワリヤ・ムケシュ, 安井武史, "テラヘルツ・カラーキャナーを用いた成分分析型内部透視イメージング", 日本機械学会2012年度年次大会, 2012/9/10, 金沢大学(金沢市) .
- ⑲ 中村翔太, 吉岡修司, 安井武史, 岩田哲郎, 水谷康弘, "テラヘルツ・パルス・エコー法を用いた不透明薄膜の非接触リモート膜厚計測", 日本機械学会2012年度年次大会, 2012/9/10, 金沢大学(金沢市) .
- ⑳ (招待講演)安井武史, "ギャップレスなテラヘルツ波コムの発生と分光への応用", 日本学術振興会・光電相互変換第125委員会/光エレクトロニクス第130委員会/テラヘルツ波科学技術と産業開拓第182委員会合同研究会「光と電波の境界領域における最近の話題」, 2012/7/20, 明治大学(東京都) .
- ㉑ (招待講演)安井武史, "ギャップレスTHzコムを用いた精密THz分光", 第4回超高速光エレクトロニクス研究会, 2012/06/08, 慶応大学(横浜市) .
- ㉒ T. Yasui, Y.-D. Hsieh, Y. Iyonaga, H. Inaba, K. Minoshima, S. Yokoyama, and T. Araki, "Sweeping of THz frequency comb for high-accuracy, high-resolution, and broadband THz spectroscopy", CLEO:Science & Innovations 2012, 2012/5/7, SanJose Convention Center (サンノゼ・USA) .
- ㉓ 梶本啓介, 横山修子, 荒木勉, 安井武史, "テラヘルツ帯ドップラー計測に関する基礎研究(II)~ウェーブレット変換の利用~" 第59回応用物理学関係連合講演会, 2012/3/16, 早稲田大学(東京都) .
- ㉔ (招待講演)安井武史, "デュアル光コムを基準とした超精密テラヘルツ・シンセサイザーの開発", レーザー学会学術講演会第32回年次大会, 2012/1/30, TKP仙台カンファレンスセンター(仙台市) .
- ㉕ (招待講演)T. Yasui, "How to measure THz frequencies with high precision", The 4th Japan-Korea Joint workshop on THz

Technology, 2011/12/19, 名古屋大学 (名古屋市) .

- ②⑥ M. Jewariya, K. Kawamoto, M. Nose, Y. Sakaguchi, T. Yasui, H. Inaba, K. Minoshima, and T. Araki, "Evaluation of spectral resolution and accuracy in asynchronous-optical sampling THz time-domain spectroscopy", 36th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2011/10/5, ハイアットリージェンシー・ヒューストン (ヒューストン・USA) .
- ②⑦ (招待講演) T. Yasui, "THz color scanner for moving objects", Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics 2011, 2011/9/30, シドニー国際会議場 (シドニー・オーストラリア) .
- ②⑧ 榎本啓介, 横山修子, 荒木勉, 安井武史, "テラヘルツ帯ドップラー計測に関する基礎研究", 第72回応用物理学会学術講演会, 2011/9/1, 山形大学 (山形市) .
- ②⑨ T. Yasui, M. Fujio, R. Nakamura, S. Yokoyama, and T. Araki, "Phase-slope measurement of tunable CW-THz radiation and application for distance measurement of optically rough object", CLEO: Science & Innovations 2011, 2011/5/5, ボルチモア国際会議場 (ボルチモア・USA)

[図書] (計1件)

- ① (分担執筆) T. Yasui, "Handbook of terahertz technology for imaging, sensing and communications", Woodhead Publishing, pp. 436-463 (2012).

[その他]

ホームページ等

<http://femto.me.tokushima-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安井 武史 (YASUI TAKESHI)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス
研究部・教授

研究者番号：70314408

(2) 研究分担者

荒木 勉 (ARAKI TSUTOMU)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授

研究者番号：50136214

(3) 連携研究者

該当無し