

令和元年5月24日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06403

研究課題名(和文) 広帯域テラヘルツパルス電力の精密測定技術の開発

研究課題名(英文) Development of accurate measurement techniques for broadband terahertz pulse power

研究代表者

飯田 仁志 (IIDA, HITOSHI)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究グループ長

研究者番号：40392584

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、テラヘルツ波技術発展の課題となっていた広帯域パワーの高感度絶対測定を実現した。センサーに不可欠な広帯域吸収帯を開発し、それを実装した高感度カロリメータによって常温において100 GHzから3 THz以上の周波数範囲において数十ナノワット以上のパワーを定量的に定め得ることを示した。本成果によって信頼性が保証された広帯域テラヘルツパワーの測定が可能になり、テラヘルツパルス波を用いた分光やイメージングなどの応用技術の発展に多大な貢献ができる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

テラヘルツ波の産業応用が期待されているが、本質的に広帯域なテラヘルツ波パワーを正確に評価する方法がなく、装置の信頼性や電磁波暴露に対する安全性などの保証ができないことが大きな課題となっていた。本研究では、テラヘルツパルスにも適用可能な常温動作の広帯域高感度パワーセンサを実現することで、その定量的評価を可能とし、テラヘルツ分光・イメージングなど産業応用が期待されている新たな技術の発展・普及を加速する。

研究成果の概要(英文)：We have developed a highly-sensitive absolute power meter for broadband terahertz (THz) measurements. A broadband absorber which is crucial for sensing THz power was designed and implemented in the calorimeter. The calorimeter has achieved quantitative measurements even at several dozen nanowatt levels in the frequency range from 100 GHz to 3 THz or more at room temperature. This study enables reliable measurement of broadband THz power, and can accelerate the development of spectroscopy and imaging technology using THz pulse waves.

研究分野：電磁波計測

キーワード：テラヘルツ波 パワーセンサ 広帯域測定 定量測定 校正 不確かさ

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

近年、テラヘルツ分光技術による新規物性材料の創生やセキュリティ応用、医学応用等への挑戦が進められている。テラヘルツ分光では、パルス光源などを用いて広帯域な分光情報を取得する。しかしながら、本質的に広帯域なテラヘルツパルスパワーの定量的測定が困難なため、その安全な利用や測定結果の信頼性保証に課題が残っている。すなわち、現状では測定結果の解析は任意単位による相対的な評価となってしまう、基準を明確に定めなければ信頼性を保証することができず、応用技術の実用化に支障をきたす。研究代表者らは、これまでに先行研究としてカロリメータ方式による単一連続光テラヘルツ絶対パワーセンサを開発した。このセンサでは、常温において微弱なパワーの絶対値を測ることができるため、前述の基準を定めるのに有効である。しかしながら、センサの有効帯域に制限があったため、パルス光源などの広帯域測定への適用が難しいという課題があった。本研究では、この技術を拡張することで、テラヘルツパルスなどにも適用可能な広帯域パワー測定を高精度に実現する方法の確立を目指す。

2. 研究の目的

本研究ではまず広帯域テラヘルツ絶対パワーセンサの開発を行い、広帯域スペクトルを有するテラヘルツパルスパワーの定量的測定法の確立を目指す。測定の不確かさを詳細に解析するため、パルス光源やそれと等価な帯域を模擬可能な波長可変光源を用いて正確に評価する。研究期間内には以下の課題に挑戦し、光源の絶対パワー校正や、パルス光源を利用した分光装置の定量評価技術を開発することを目的とする。

- (1) 広帯域化の要素技術となる最適な吸収体素子を見出す。現状は 1 THz 近傍の特定範囲にのみ良好な感度を確認しているが、0.1 THz 程度のミリ波帯から数 THz までの広帯域において特異点を持たない吸収体構造を解析し、効率の良い吸収体を実現する。
- (2) カロリメータ方式による絶対パワーセンサの改良を進める。上記の吸収体を適用し、受光方法や直流置換方法などセンサ素子の構造を検討しながら広帯域における検出を実現する。
- (3) 広帯域絶対パワーを正しく定めるには測定結果のばらつきを特徴づけるパラメータ、いわゆる不確かさを推定することが重要となる。まずは基本となる連続光において、数百ギガヘルツ帯域での実験を行い、不確かさ要因の把握と解析を進める。
- (4) 改良したカロリメータによるパルスパワーの定量技術を開発する。パルス光源を利用した分光装置等を利用し、不確かさの評価を行う。
- (5) 加速器による高強度テラヘルツパルスパワーの測定を試みる。

3. 研究の方法

(1) 広帯域化のための吸収体材料及び構造の解析

吸収体は本センサを実現する上で最も重要な要素である。従来 1 THz 近傍に適した吸収体を見出したが、本研究ではより広帯域吸収を得る材料として、エポアイアンなどを想定し、ミリ波帯からテラヘルツ帯までの良好な吸収体を実現する。立体構造を利用した多重反射による吸収過程も考慮し、熱変換過程の不均一性を最小にする構造を決定する。

(2) 広帯域テラヘルツカロリメータの開発

上記で決定した吸収体と熱電変換素子によるカロリメータ受光部を試作し、これまで困難であったミリ波帯からテラヘルツ帯の空間ビーム精密検出を目指す。ビーム形状や電力レベルを推定して受光部の構造を決定する。等温制御方式に基づく構成とし、室温において十分な感度が得られる受光面積を決定する。主要な不確かさ要因となり得る安定性を向上するため、電磁シールド及び断熱構造等を検討する。

(3) 波長可変連続波テラヘルツ光源を用いた広帯域絶対パワー測定の検証

広帯域絶対パワー測定の不確かさを評価するためには、所望の帯域における熱電変換特性や感度特性などの基礎評価を行うことが肝要である。これまで単一周波数でしか検証が行われていなかったが、本研究では近赤外波長可変レーザーによる光差周波混合で波長可変テラヘルツ連続波光源を構築して広帯域における評価を進める。複数の周波数において絶対パワーを定め当該カロリメータの広帯域性を検証する。本実験を通して、パルスパワー測定に影響する感度の周波数連続性及びダイナミックレンジを詳細に評価する。

(4) 広帯域絶対パワー測定に関する不確かさ要因の解析

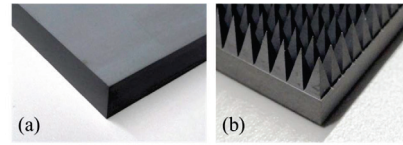
主要な不確かさ要因となり得る吸収体の吸収率や反射率について評価を進める。テラヘルツ時間領域分光装置を利用した透過・反射特性評価から吸収特性を推定するとともに、波長可変連続波テラヘルツ光源による広帯域測定の結果を分析し、不確かさ要因を明らかにする。

(5) テラヘルツパルスパワーの定量測定と不確かさ解析
 連続波による実験結果をもとに、入射するパルス波とカロリメータ双方の周波数特性の寄与を詳細に解析し、パルス測定に起因する不確かさを明らかにする。

(6) テラヘルツパルス波を用いたセンサの応答評価
 加速器によるパルス光源を想定し、理論計算との比較によるパワー測定の妥当性検証を検討する。本カロリメータを用いてパルス光源を利用した分光装置の評価についても実証実験を進める。

4. 研究成果

(1) 広帯域テラヘルツ吸収体の解析
 テラヘルツ波を効率よく吸収し、適度な熱伝導を有する材料として、従来使用していた中性濃度フィルタガラス (NG1) と比較して新たに磁気損失材料装荷エポキシ (MF-117) の吸収率、反射率をベクトルネットワークアナライザ (VNA) 及びテラヘルツ時間領域分光装置 (THz-TDS) により評価した。MF-117 の構造は図 1 に示す平板型とピラミッド型の 2 種類とした。図 2 はそれらの反射率の評価結果を示す。平板型では 0.1 THz 以上の帯域において、平坦な特性を有するものの、吸収率が悪いことが明らかとなった。一方、ピラミッド型に加工することで、大幅な吸収率の改善が可能となり広帯域カロリメータに最適であることが分かった。



Iida et al., IRMMW-THz 2017, RD.50

図 1 広帯域テラヘルツ吸収体

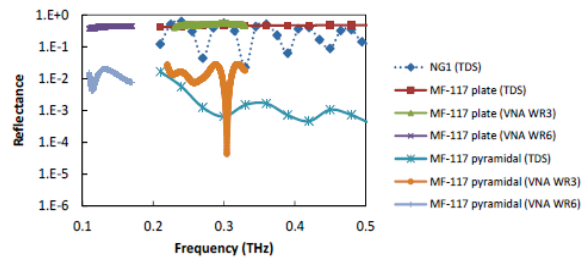


図 2 テラヘルツ吸収体の反射率

(2) 広帯域カロリメータの開発

上記のピラミッド型吸収体を実装したカロリメータ受光部を試作した (図 3)。受光部の大きさは測定対象とするテラヘルツビームのスポットサイズを考慮して直径 15 mm とした。動作検証の結果、1 μ W 程度以下の高感度測定では環境温度の変動による外乱の影響が大きいことが明らかとなった。そこで、アルミによる多重シールド構造に加え、真空断熱パネルを採用した高断熱チャンバーを実現し、この影響を最小限に抑えてヒータ

Iida et al., J Infrared Milli Terahz Waves (2018) 39, 409-421

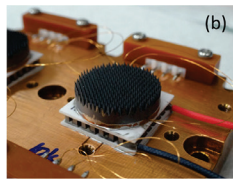


図 3 カロリメータ受光部

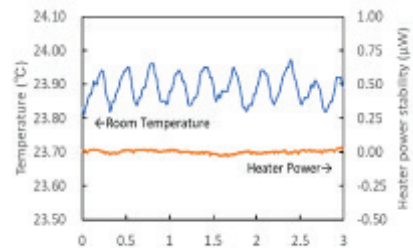


図 4 真空断熱パネルによるドリフト抑制

パワーのドリフトを数十 nW 程度まで安定化することに成功した (図 4)。

(3) 波長可変連続波テラヘルツ光源を用いた広帯域絶対パワー測定の検証

近赤外波長可変レーザを一次光源とし、フォトミキサによる波長可変連続波テラヘルツ光源を構築し広帯域評価を進めた。図 5 はその評価系を示す。本系では少なくとも 0.3~2 THz における絶対パワーを測定できることが明らかとなり、従来は正確な測定が困難であった 0.3 THz においても高感度に精密に絶対パワーを定めることができる。図 6 は 0.3 THz におけるカロリメータのヒータパワーの応答を示し、ステップの変化分から入射パワーの絶対値を定めることができる。

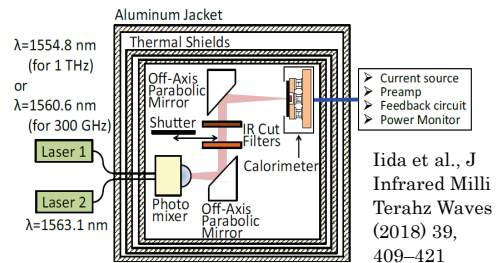


図 5 波長可変光源による評価系

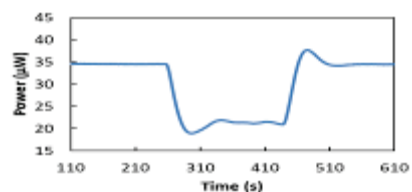


図 6 0.3 THz におけるカロリメータ応答

(4) 広帯域絶対パワー測定に関する不確かさ要因の解析

主要な不確かさ要因となる吸収体の吸収率については、VNA 及び THz-TDS による評価から不確かさの寄与を詳細に解析した。本カロリメータでは入射波のパワーを

表1 0.3 THz、13 μ W のパワー測定における不確かさバジェット

Source of uncertainty	Type	Probability distribution	Uncertainty contribution (%)		
			NG1 disk	MF117 disk	MF117 pyramid
Absorber	B	Rectangular	25.3	7.5	2.4
Thermal equivalence	B	Rectangular	0.4	0.4	1.3
Uniformity	B	Rectangular	0.2	0.2	0.2
DC measurement	B	Rectangular	0.1	0.1	0.1
Random	A	Normal	2.0	1.9	1.5
Combined standard uncertainty			25.4	7.8	3.1
Expanded uncertainty ($k=2$)			50.8	15.6	6.2

Iida et al., J Infrared Milli Terahz Waves (2018) 39, 409–421

吸収体で熱に置換し、それと等価な熱を発生する直流ヒータのパワーと比較して絶対値を定める。したがって、テラヘルツ波と直流による吸収体における熱の等価性が崩れると大きな不確かさとなる。そこで、等価性については有限要素法による熱シミュレーションによって詳細に解析した。図7は受光部の熱シミュレーションモデルを示す。テラヘルツ波及び直流ヒータパワーをそれぞれ与えたときの熱電変換素子の各場所における温度分布を計算し、それらの差から限界値を定めて不確かさを推定した。これらの解析の結果、0.3 THz、13 μ W における不確かさバジェットを表1に示す。従来の方 (NG1 disk) に比べて、本手法 (MF117 Pyramid) では不確かさを大幅に改善することができた。

Iida et al., J Infrared Milli Terahz Waves (2018) 39, 409–421

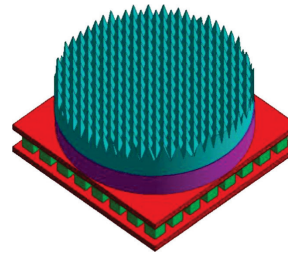


図7 受光部の熱シミュレーションモデル

(5) テラヘルツパルスパワー定量測定と不確かさ解析

広帯域に分布した周波数成分を有するテラヘルツ波パルスの平均パワーを正確に測定するためには、必要な帯域において、吸収体の吸収率が一定であることが望ましい。また、吸収率が小さく補正量が大きくなるにつれて不確かさも増大することが懸念される。本カロリメータで採用したピラミッド型吸収体では、0.1~3 THz 程度まで概ね99%以上の吸収率を実現することができた。この周波数特性を考慮すると、3 THz 程度の周波数成分をもつパルス波については正確に平均パワーを定めることができることが分かった。

(6) テラヘルツパルス波を用いたセンサの応答評価

加速器による高強度テラヘルツ波パルスの理論計算との比較によってカロリメータの妥当性を検証することを想定していたが、実際の測定環境において高感度センサであるカロリメータに対する様々な外乱 (ノイズ) や安定性などの課題があり精密な検証が困難であることが分かった。しかしながら、前述の波長可変光源による検証及び不確かさ評価の結果から、本カロリメータはパルスの平均パワーを正しく測定できることが明確となった。

ところで、THz-TDS などの分光装置では、光伝導スイッチなどのパルス光源が使用されている。このような分光装置は測定のダイナミックレンジが広いことから、パルス光源が発生するパワーの相対的な変化、すなわち線形性を定量的に評価し、不確かさを推定することが課題となっていた。本研究では、広帯域に一定の減衰量を有する薄膜減衰器をカロリメータによって校正し、それを用いて THz-TDS の振幅校正を行う技術を開発した。図8はカロリメータで校正を行った広帯域薄膜減衰器であり、これを用いて THz-TDS の線形性を1 THz において評価した結果を図9に示す。さらに、薄膜減衰器の校正値を参照値として THz-TDS の振幅校正を行い、不確かさを解析した。表2に1 THz における透過率測定の不確かさバジェットを示す。本校正技術によって、THz-TDS による透過率測定の不確かさ評価法を確立した。

Iida et al., IEEE Trans. Instrum. Meas. (2017) 66

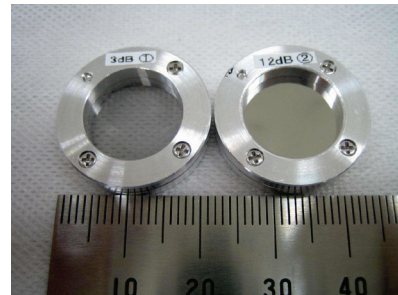


図8 広帯域薄膜減衰器

Iida et al., J Infrared Milli Terahz Waves (2018) 39, 120–129

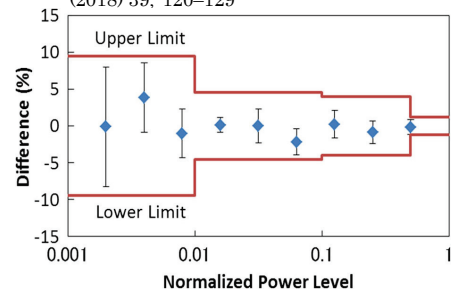


図9 THz-TDS の線形性評価

表 2 1 THz における透過率測定の不確かさバジェット

Source of uncertainty	Type	Probability distribution	Transmittance			
			0.5	0.1	0.01	0.001
Reference standard	B	Normal	2.4	2.4	2.4	2.4
Linearity	B	Rectangular	0.7	2.3	2.7	5.5
Stability (background measurement)	B	Rectangular	1.2	1.2	1.2	1.2
Stability (sample measurement)	B	Rectangular	1.2	1.2	1.2	1.2
Sample alignment	B	Rectangular	0.3	0.3	0.3	0.3
Sample uniformity	B	Rectangular	0.3	0.3	0.3	0.3
Random	A	Normal	0.8	0.8	1.3	3.1
Relative standard uncertainty (%)			3.2	3.8	4.2	7.0
Relative expanded uncertainty, $k = 2$ (%)			6.4	7.6	8.4	14.0

Iida et al., *J Infrared Milli Terahz Waves* (2018) 39, 120–129

以上の結果、0.1 THz からのミリ波領域を含む広帯域テラヘルツ波パワーの定量測定を実現した。これによって、従来校正が困難であった空間ビーム型パワーメータの広帯域校正が可能となり、パワー測定信頼性を一段と向上させることに成功した。特に、1 THz 以下の周波数領域における精密校正を可能としたことは、今後の発展が期待される超高速無線通信やテラヘルツセンシング技術の実用化に大きく貢献するものである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 6 件)

- ① Hitoshi Iida, Moto Kinoshita, Kuniaki Amemiya and Yuya Tojima, “Terahertz Power Calibration Using Absolute Reference Calorimeter,” *IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng.*, 2019, in press, 査読有
- ② 飯田 仁志、木下 基、雨宮 邦招、テラヘルツ波絶対パワーの精密測定、レーザー研究、47-1、2019、pp. 37-41、査読有
- ③ Hitoshi Iida, Moto Kinoshita and Kuniaki Amemiya, “Accurate Measurement of Absolute Terahertz Power Using Broadband Calorimeter,” *J. Infrared Milli. Terahz. Waves*, 39, 2018, pp. 409-421, DOI 10.1007/s10762-018-0477-3, 査読有
- ④ Hitoshi Iida and Moto Kinoshita, “Amplitude Calibration in Terahertz Time-Domain Spectroscopy Using Attenuation Standards,” *J. Infrared Milli. Terahz. Waves*, 39, 2018, pp. 120-129, DOI 10.1007/s10762-017-0440-8, 査読有
- ⑤ Hitoshi Iida, Moto Kinoshita and Kuniaki Amemiya, “Calibration of a Terahertz Attenuator by a DC Power Substitution Method,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 66, 2017, pp. 1586-1591, DOI 10.1109/TIM.2016.2637498, 査読有
- ⑥ 飯田 仁志、高感度テラヘルツ波パワーセンサー、光技術コンタクト、55-3、2017、pp. 31-37、査読無

〔学会発表〕 (計 14 件)

- ① 飯田 仁志、木下 基、雨宮 邦招、東島 侑矢、テラヘルツ波パワーの定量評価・校正技術の開発、学振テラヘルツ波科学技術と産業開拓第 182 委員会第 38 回研究会、2019
- ② Hitoshi Iida, Moto Kinoshita, Kuniaki Amemiya and Yuya Tojima, “Absolute terahertz power measurement of tens of nanowatts using a highly-sensitive calorimeter at room temperature,” *Conference on Precision Electromagnetic Measurements*, 2018
- ③ 飯田 仁志、高感度テラヘルツ波パワーセンサの開発、第 52 回センサ&アクチュエータ技術シンポジウム、2018
- ④ 飯田 仁志、木下 基、東島 侑矢、雨宮 邦招、テラヘルツ波のパワーを正確に測る、産業技術総合研究所 計測・分析フェア in 京都、2018
- ⑤ 飯田 仁志、ミリ波・テラヘルツ波パワーの精密測定技術、電気学会計測研究会、2018
- ⑥ Hitoshi Iida and Moto Kinoshita, “Broadband Absorber for a Terahertz Calorimeter,” *42nd Int. Conf. IRMMW-THz*, 2017
- ⑦ 飯田 仁志、木下 基、広帯域テラヘルツ吸収体に関する検討、第 64 回応用物理学会春季学術講演会、2017
- ⑧ 木下 基、飯田 仁志、藤井 勝巳、テラヘルツ波パワーの精密計測技術と計量標準、学振テラヘルツ波科学技術と産業開拓第 182 委員会第 31 回研究会、2017
- ⑨ Moto Kinoshita, “Precise power measurements of electromagnetic waves including microwave, millimeter-wave and terahertz-wave,” *Emerging Scientist Workshop 2017*, Selected oral presentation, 2017
- ⑩ Moto Kinoshita, “Precise power measurements of electromagnetic waves including

microwave, millimeter-wave and terahertz-wave,” Emerging Scientist Workshop 2017, poster presentation, P-14, 2017

- ⑪ 飯田 仁志、テラヘルツ波の精密計測、(一社) 研究産業・産業技術振興協会 第2回研究産業技術懇談会、2017
- ⑫ 東島 侑矢、木下 基、飯田 仁志、藤井 勝巳、ミリ波・テラヘルツ波パワーの精密計測技術、電子情報通信学会 アンテナ・伝播研究専門委員会、2017
- ⑬ 木下 基、飯田 仁志、島岡 一博、平 義隆、雨宮 邦招、藤井 勝巳、ミリ波およびテラヘルツ波のパワー計測、電気学会計測研究会、2016
- ⑭ Hitoshi Iida, Moto Kinoshita and Kuniaki Amemiya, “Study on Calibration of Terahertz Attenuator,” *Conference on Precision Electromagnetic Measurements*, 2016

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：木下 基

ローマ字氏名：(KINOSHITA, Moto)

所属研究機関名：国立研究開発法人産業技術総合研究所

部局名：物理計測標準研究部門

職名：主任研究員

研究者番号 (8桁)：00415671

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：黒田 隆之助

ローマ字氏名：(KURODA, Ryunosuke)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。