

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 20 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420428

研究課題名(和文)高精度テラヘルツ絶対電力センサー素子の開発

研究課題名(英文)Development of a precision absolute terahertz power sensor

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・物理計測標準研究部門・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) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：微弱なテラヘルツ波の絶対電力を常温において高感度に測定するためのセンサーを開発した。本センサーでは、テラヘルツ波の吸収によって発生する熱を熱電変換素子によって直流電気信号に変え、それをもとに直流電力を吸収体に設置されたクーラーに与えて吸収体の温度を等温制御する。この釣り合いを利用して、クーラーに与えた直流電力を精密に計測し、テラヘルツ波のパワーを決定する。この直流電力への変換技術と温度制御技術の高度化により、液体ヘリウムによる極低温環境を必要としない常温での微弱テラヘルツ波パワーの精密測定を実現した。測定の不確かさ解析を詳細に行い、数十ナノワットレベルの定量的測定が可能なることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We have developed a highly-sensitive terahertz power sensor for determining very small absolute power at room temperature. In this sensor, heat generated by absorption of terahertz waves is changed into a DC signal with thermoelectric modules. Then, the DC power based on the signal is given to a cooler put on the absorber and its temperature is kept constant. By using this balanced state, the terahertz power is determined by measuring the DC power given to the cooler. A precision measurement of small terahertz power at room temperature that did not need the extremely low temperature environment with liquid helium was achieved by realizing the DC power transformational technology and the temperature control technology. A quantitative measurement at several dozen nanowatts was demonstrated and its uncertainties were analyzed in detail.

研究分野：電磁波計測工学

キーワード：テラヘルツ 絶対電力測定 不確かさ

1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ波の計測技術が進歩し、様々な応用研究が進められているが、その精度評価技術の確立が課題となっている。テラヘルツ波に関する測定量として、パワーは最も基本的な物理量である。テラヘルツ波パワーセンサーとして、焦電素子やゴーレイセルなどの相対パワーセンサーは実用化されているが、これらは校正、すなわち目盛付けを行って使用する必要がある。しかしながら、校正に必要な絶対電力センサーの確立が進んでおらず、現状は近似的な推定によって目盛付けが行われているため、測定結果のばらつきが大きく信頼性を担保できないことが課題となっている。

研究代表者らは、これまでテラヘルツ分光装置の精度評価のため金属薄膜減衰器を用いた相対パワー評価法の開発や、マイクロ波・ミリ波領域におけるカロリメータ方式によるパワーの絶対測定技術の研究に取り組んできた。これらの技術を高度化すれば、トレーサビリティが確保されたテラヘルツ波パワーの精密測定が可能となることから、テラヘルツ帯絶対電力センサー素子の研究開発に着手した。

2. 研究の目的

本研究では、テラヘルツ波パワーの精密測定を実現するために、吸収体のテラヘルツ吸収特性や熱変換過程を明らかにし、カロリメータ法に基づく常温で容易に使用できる高精度テラヘルツ波絶対電力センサー素子を開発することを目的とする。その要素技術として、以下の点を明らかにする。

(1)テラヘルツ波の吸収材料を調査し、吸収率を解析してセンサー素子に用いる材料を決定する。

(2)テラヘルツ波の吸収により発生する微弱熱量計測から絶対電力を定める高感度検出器を実現する。

(3)電磁波エネルギーの吸収と熱伝導メカニズムを解析し、熱変換過程を明らかにする。

(4)当該センサーによる計測手法に起因する不確かさ要因を詳細に解析して絶対電力測定に対する寄与を明らかにする。

3. 研究の方法

(1)テラヘルツ波吸収材料の解析

テラヘルツ時間領域分光による反射率・透過率測定により、吸収効率の高い電磁波吸収材料を調査する。熱線吸収ガラスやセラミックス複合材料などを想定し、平面形状の試料について評価を行う。

(2)テラヘルツ波吸収熱検出法の研究
テラヘルツ波吸収による熱変化を効率よく

検出する方法を検討する。実用性を考慮し、液体ヘリウムによる極低温環境を必要としない常温での検出を実現する。具体的には、テラヘルツ波吸収による温度上昇を熱電変換素子によって電気信号に変換し、それをもとに上昇した温度分の電力を直流電力に置換して測定する手法を検討する。選定したテラヘルツ吸収体を用いて、入射パワーの熱変換効率が良く、不確かさ評価の容易な構造を検討して高感度テラヘルツ波パワーセンサーを実現する。

(3)テラヘルツ波パワーの熱変換過程の解明
有限要素法などによる熱伝導シミュレーションによって、吸収体におけるテラヘルツ波の吸収と発熱及び熱伝導メカニズムを明らかにする。

(4)不確かさ解析

主要な不確かさ要因を解析して絶対電力測定の不確かさを明らかにする。熱変換過程の解析結果から、吸収体の熱変換に起因する不確かさを推定する。周囲温度の変化に起因する温度ドリフトについては、センサーの断熱構造を工夫してその低減を目指す。その他、再現性、素子の均一性、ノイズの影響などを考慮して不確かさを評価する。

(5)絶対電力測定の検証

開発した複数の絶対電力センサーと、市販のパワーセンサーとの測定比較をすることにより、パワー測定の妥当性検証を行う。

4. 研究成果

(1)テラヘルツ波吸収材料の解析

テラヘルツ波を効率よく吸収し、熱伝導性も比較的良い材料として Neutral Density (ND) フィルタガラスを選定し、時間領域分光装置による反射率評価を行った。図1は円盤状に光学研磨したNDフィルタガラスの反射率測定結果である。比較的良好な吸収が得られたので、不確かさ評価の容易な円盤構造を採用した。

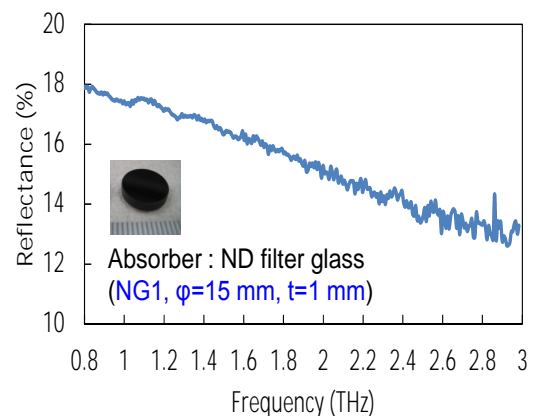


図1 時間領域分光装置によるテラヘルツ吸収体の反射率測定

(2)テラヘルツ波絶対電力センサーの開発
開発したテラヘルツ波絶対電力センサーを図2に示す。検出部は、上記に示した吸収体と、吸収体の裏面に配置されたクーラー、熱電変換素子、基準温度ブロックで構成される。

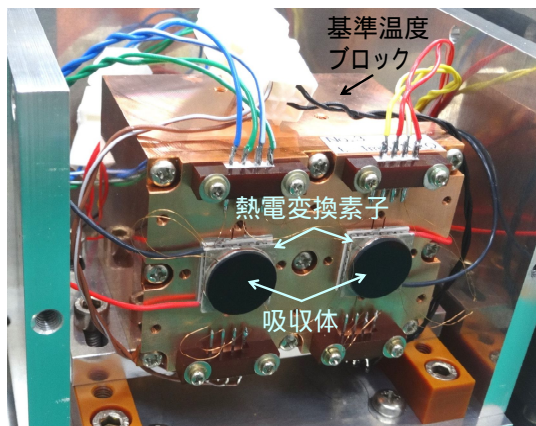


図2 開発したテラヘルツ波絶対電力センサー

検出部にテラヘルツ波が照射されると吸収体の温度が上昇する。この温度上昇を熱電変換素子によって電気信号に変換し、それをもとに上昇した温度分の電力をクーラーに与えて吸収体の温度を下げ、常に基準温度（基準温度ブロックの温度）に保つように制御する。クーラーに与えた直流電力を計測し、テラヘルツ波の吸収による温度上昇と、クーラーによる冷却が釣り合っていることを利用して、テラヘルツ波パワーを求めることができる。検出感度を向上するためには、直流電力の測定精度を高精度化して環境温度の変動を抑える必要があることが明らかとなった。本センサーでは、センサー周囲に真空断熱材を利用した多層の断熱遮蔽を施し、外部からの熱擾乱を極限まで抑えることによって、液体ヘリウムを必要としない常温での高感度測定を実現した。この条件の下、図3に示すように1テラヘルツにおいて、数十ナノワットレベルの測定が可能であることを明らかにした。

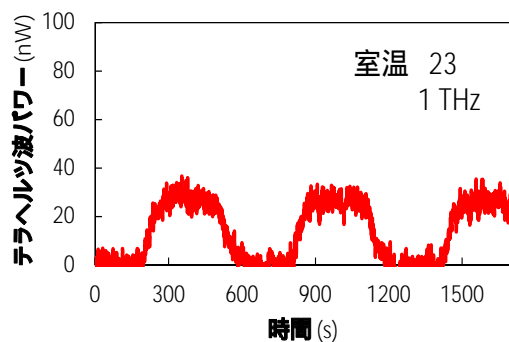


図3 開発したセンサーによるテラヘルツ波パワーの高感度測定の結果

(3)テラヘルツ波パワーの熱変換過程の解明
有限要素法による熱伝導シミュレーションにより、図4に示すシミュレーションモデルを構築してテラヘルツ波の吸収による熱伝導メカニズムを明らかにした。同時に検出感度ムラやテラヘルツ波パワーと直流電力の等価性についてもシミュレーションを行い、不確かさ要因を明らかにした。

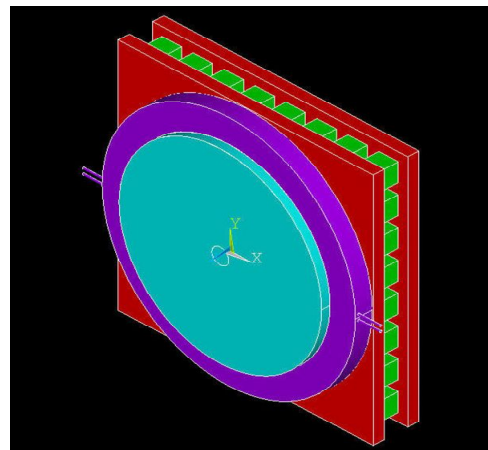


図4 テラヘルツ受光部の熱変換過程シミュレーションモデル

(4)不確かさ解析

理論的実験的手法によって、本センサーによるテラヘルツ絶対電力測定の不確かさを評価した。不確かさの要因は表1に示すとおりであり、1テラヘルツ、0.6マイクロワットの測定において2.4%の拡張不確かさで定量的測定ができることを明らかにした。

不確かさ要因	Type	不確かさの寄与 (%)
吸収体	B	0.9
THz/DC等価性	B	0.4
均一性	B	0.2
直流測定	B	0.1
ランダム	A	0.6
合成標準不確かさ		1.2
拡張不確かさ (k=2)		2.4

表1 1テラヘルツ、0.6マイクロワット測定時の不確かさバジェット

(5)絶対電力測定の検証

本研究によって開発した2台の絶対電力センサーと、市販のテラヘルツパワーメータの測定比較を行った。同一のテラヘルツ光源から発生するテラヘルツ波パワーをそれぞれのセンサーで測定した結果を図5に示す。測定周波数は1テラヘルツ、入射パワーは0.6マイクロワットである。同図より、開発した2台のセンサーによる測定結果は非常に良く

一致した。市販のパワーメータによる測定では、不確かさをメーカー仕様から推定した。いずれの測定結果も不確かさの範囲内で一致した。

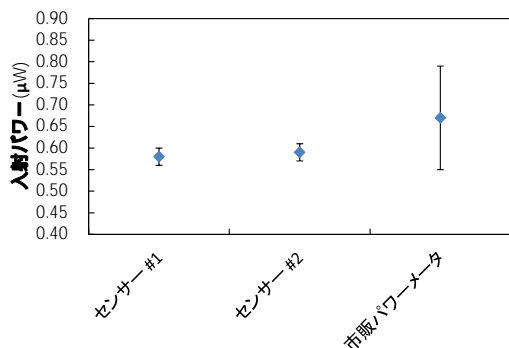


図5 テラヘルツパワーの測定比較結果

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4件)

H. Iida, M. Kinoshita, K. Amemiya and Y. Shimada, "Calorimetric measurement of absolute terahertz power at the sub-microwatt level," Optics Letters, 査読有, Vol. 39, pp. 1609-1612, 2014, DOI:10.1364/OL.39.001609

飯田仁志, 「図解：学術講演会大分類 応用物理一般」, 応用物理、査読無、83巻、p.622

島田洋蔵, 飯田仁志, 木下基, 「テラヘルツ帯計量標準の研究開発動向」, 電子情報通信学会誌、97巻、査読無、pp. 1000-1005

Y. Shimada, H. Iida and M. Kinoshita, "Recent research trends of terahertz measurement standards," IEEE Trans. Terahertz Sci. Tech., 査読有, Vol. 5, pp. 1166-1172

[学会発表](計16件)

飯田仁志, 木下基, 島田洋蔵, 「テラヘルツ絶対電力センサー用吸収体に関する検討」, 第74回応用物理学会秋季学術講演会、2013年9月16日~20日、同志社大学京田辺キャンパス(京都府・京田辺市)

木下基, 飯田仁志, 島田洋蔵, 「テラヘルツ電力測定にむけた光源の予備評価」, NMIJ2013年度成果発表会、2014年1月24日、産業技術総合研究所つくばセンター(茨城県・つくば市)

飯田仁志, 木下基, 雨宮邦招, 島田洋蔵, 「テラヘルツ絶対電力測定のための微小熱量検出に関する検討」, 第61回応用物理学会春季学術講演会、2014年3月17日~20日、青山学院大学相模原キャンパス(神奈川県・相模原市)

木下基, 飯田仁志, 雨宮邦招, 島田洋蔵, 「テラヘルツカロリメータによる微小電力測定のためのノイズ対策」, 第61回応用物理学会春季学術講演会、2014年3月17日~20日、青山学院大学相模原キャンパス(神奈川県・相模原市)

H. Iida, M. Kinoshita, K. Amemiya and Y. Shimada, "Repeatability of absolute terahertz power measurement using a sensitive calorimeter," 39th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2014), Sep. 15, 2014, The University of Arizona, Tucson, (USA)

M. Kinoshita, H. Iida, K. Amemiya and Y. Shimada, "Numerical simulation of DC equivalent factor of THz calorimeter," 39th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2014), Sep. 15, 2014, The University of Arizona, Tucson, (USA)

飯田仁志, 木下基, 雨宮邦招, 島田洋蔵, 「テラヘルツ帯カロリメータによる絶対電力の測定」, 2014年度計量標準成果発表会、2014年1月23日、産業技術総合研究所つくばセンター(茨城県・つくば市)

飯田仁志, 木下基, 雨宮邦招, 島田洋蔵, 「テラヘルツカロリメータの直線性評価」, 第62回応用物理学会春季学術講演会、2015年3月14日、東海大学(神奈川県・平塚市)

H. Iida, M. Kinoshita, K. Amemiya, Y. Shimada, M. Asada and S. Suzuki, "Calibration of radiated power from a resonant tunneling diode oscillator by a terahertz calorimeter at room temperature," Joint Symposium of the 3rd International Symposium on Microwave/Terahertz Science and Application (MTSA 2015) and The 6th International Symposium on Terahertz Nanoscience (Teranano 2015), Jun. 30-Jul. 4, 2015, 沖縄科学技術大学院大学(沖縄県・恩納村)

H. Iida, M. Kinoshita, K. Amemiya and Y. Shimada, "A comparison of terahertz power measurements at sub-microwatt level," 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2015), Aug. 23-28, 2015, The University of Hong Kong, Hong Kong, (China)

木下基、飯田仁志、島岡一博、島田洋蔵、「カロリーメータによるミリ波・テラヘルツ波の電力測定」、応用物理学会・テラヘルツ電磁波技術研究会第1回研究討論会/テラヘルツテクノロジーフォーラム第1回テラテク技術セミナー、2015年10月6日～7日、徳島大学(徳島県・徳島市)

H. Iida, M. Kinoshita, K. Amemiya and Y. Shimada, "Development of a terahertz calorimeter at NMIJ," 18th Asia Pacific Metrology Programme TCEM Meeting, Nov. 1-4, 2015, National Institute of Metrology, Beijing, (China)

飯田仁志、木下基、雨宮邦招、「テラヘルツ波微弱電力の精密測定技術の開発」、2015年度計量標準総合センター成果発表会、2016年2月9日～10日、産業技術総合研究所つくばセンター(茨城県・つくば市)

平義隆、飯田仁志、木下基、坂上和之、黒田隆之助、「テラヘルツ波パワーの絶対値測定による電子ビーム診断」、2015年度計量標準総合センター成果発表会、2016年2月9日～10日、産業技術総合研究所つくばセンター(茨城県・つくば市)

平義隆、飯田仁志、木下基、坂上和之、黒田隆之助、「テラヘルツ波パワーの絶対値測定による電子ビーム診断」、分子研研究会「高輝度・高強度赤外光源の現状と今後の展開」、2016年2月11日、岡崎コンファレンスセンター(愛知県・岡崎市)

木下基、飯田仁志、島岡一博、雨宮邦招、藤井勝巳、「ミリ波・テラヘルツ波カロリーメータによるパワー測定」、2016年電子情報通信学会総合大会、2016年3月15日～18日、九州大学(福岡県・福岡市)

〔その他〕

ホームページ等

http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2016/pr20160118/pr20160118.html

6. 研究組織

(1)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物理計測標準研究部門・研究グループ長

研究者番号：40392584

(2)研究分担者

木下 基 (KINOSHITA, Moto)

国立研究開発法人産業技術総合研究所物理計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号：00415671