

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：32607

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560412

研究課題名(和文) テラヘルツ波エリプソメトリー用小型モジュールの開発

研究課題名(英文) Development of compact modules for terahertz-wave ellipsometry

研究代表者

伊藤 弘 (ITO, HIROSHI)

北里大学・一般教育部・教授

研究者番号：50525384

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：新たな構成の平面アンテナを考案することにより、ミリ波・サブミリ波帯において良好な直線偏波特性を持つ小型アンテナを実現すると共に、このアンテナを集積化した単一走行キャリア・フォトダイオードを用いたテラヘルツ波発生器モジュール、及びショットキーバリアダイオードを用いたテラヘルツ波検出器モジュールを開発した。また、作製したモジュールをテラヘルツ波エリプソメトリー測定に適用し、外部偏光子/検光子を用いることなく、生体関連材料の複素比誘電率測定を実現した。

研究成果の概要(英文)：A quasi-optical terahertz-wave emitter module implementing a uni-traveling-carrier photodiode and a quasi-optical terahertz-wave detector module implementing a Schottky barrier diode were developed. Newly developed self-complementary reflection-symmetry planar bowtie antennas together with new device integration configurations for the antenna electrode enabled to realize linearly polarized signal emission and detection with stable principal polarization axis angle, polarization factors close to unity, and small degree of extinction in the millimeter and sub-millimeter wave regions at very small or zero bias condition. Both modules also exhibited good linearity in input-output characteristics in the millimeter and sub-millimeter wave regions which is important for low distortion measurements. Using the fabricated modules, terahertz-wave ellipsometry was successfully demonstrated by measuring complex relative dielectric constants of purified water without using external polarizers.

研究分野：電子工学、電子デバイス

キーワード：単一走行キャリア・フォトダイオード ショットキーバリアダイオード 平面アンテナ 偏波 テラヘルツモジュール

1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ波(概ね 100GHz から 10THz 程度の電磁波)は、人類に残された最後の未開拓電磁波と呼ばれ、医療診断、薬物検査、危険物検査、製品検査など、国民の生活に関連の深い重要な応用への研究開発が進められている。主要な応用はイメージング及び分光に大別されるが、イメージングでは得られる材料情報が限定的であること、分光において一般的な「パルス波」を用いる方法では、周波数分解能などの点で制約があること、などの課題があった。また、装置が大型(机程度)で高価であるという課題もあった。

これに対し、報告者らは第3の計測技術とも呼べる「ミリ波エリプソメトリー技術」を構築し、人体皮膚の複素比誘電率測定を実現した。この手法は、被測定物の材料物性を定量的に計測できることに加え、分光技術と比べて測定系の構成が小型・簡易・安価であるという特徴を持つ。また、報告者らが開発した「単一走行キャリア・フォトダイオード(UTC-PD)」を利用した新しい電磁波発生技術を用いることで、医療応用における「ベッドサイドで患者の様々な部位に測定機器を近づける」という課題も解決できる。

この電磁波エリプソメトリー技術をテラヘルツ帯へ拡張するためには、信号の偏波制御技術が重要となるが、テラヘルツ波の放射で多用されている平面アンテナは放射パターンや偏波方位が周波数依存性を持つため、エリプソメトリーには適していなかった。また、外部偏光子/検光子を用いる構成は、サイズ、コスト、部品の堅牢性などの観点で、実用上の障害になっていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、医療応用に適する、テラヘルツ波を用いた実用的な診断・計測機器を実現するための要素技術として、これまでに無かった小型・軽量で、取り回しが容易な「エリプソメトリー用テラヘルツ波発生、及び検出モジュール」を開発することである。そのためには、テラヘルツ帯で動作する偏波制御された平面アンテナ、及びその実装構成を開発することが重要なポイントとなる。

3. 研究の方法

本研究は、以下の3つの項目の実現を目標とした。

(1) テラヘルツ帯平面アンテナの開発

偏波制御と集積化に適した小型平面アンテナの構成を提案すると共に、解析によりその構造を最適化し、平面アンテナの構成法を確立する。

(2) 準光学型 UTC-PD、及び SBD モジュールの実現

上記平面アンテナをモノリシック集積した信号源(UTC-PD)及び検出器(SBD)を搭載した準光学型モジュールを作製し、所望の広帯域特性と直線偏波特性を実現する。

(3) テラヘルツ波エリプソメトリーの実現
作製したモジュールを用いて生体関連材料に対するテラヘルツ波エリプソメトリーを実現する。

4. 研究成果

(1) テラヘルツ帯平面アンテナの開発

安定した直線偏波特性を実現するため、広帯域ボウタイアンテナを改良した新たな構成の偏波制御平面アンテナ(図1)を考案し、電磁界解析により構造設計を行うと共に、電極内に UTC-PD、及び SBD を埋め込んだ新たな集積化構成を開発し、試作により各アンテナ集積素子を実現した。本アンテナ構成は、従来構成と比べ、小面積でありながら広帯域特性と直線偏波特性に優れるという特徴を持っている。

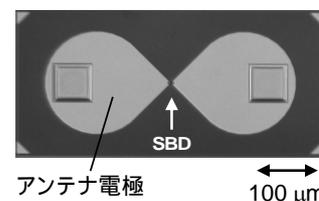


図1：開発した偏波制御平面アンテナの写真(図は SBD を集積したもの)

(2) 準光学型 UTC-PD、及び SBD モジュールの実現

作製した各アンテナ集積素子を、Si 超半球レンズを用いて図2に示す「手のひらサイズ」の準光学型筐体の実装し、UTC-PDを用いたテラヘルツ波発生モジュール、及び SBD を用いたテラヘルツ波検出モジュールを作製した。

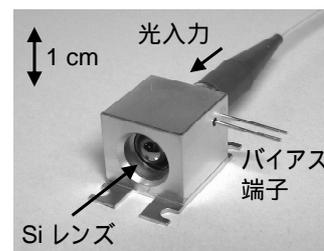


図2：開発した偏波制御テラヘルツ波発生モジュールの外観

そして、試作した各モジュールの特性評価を行った結果、UTC-PD モジュール、及び SBD モジュール共に、目標である 300GHz ~ 1THz 帯をカバーする広帯域な信号発生・信号検出動作が実現されていることを確認した。また、偏波方位の安定性(±1%以内)、高い偏光度(95%以上)、低い消光度(5%以下)などの良好な直線偏波特性(図3)を有することも確認した。これらは、新たに開発したアンテナの優れた放射・検波特性を反映している。さらに、信号の発生・検出における良好な入出力の直線性も確認した。代表的な特性としては、500GHz における出力として 50μW (光

電流 16mA 時)、500GHz における検波感度 180V/W など、いずれも良好な値が得られた。さらにこれらの素子動作は、信号発生器としてはわずかに-0.4V のバイアス電圧、信号検出器に至ってはゼロバイアスで動作するなど、素子特性面だけでなく実用的にも重要な結果が得られた。以上の結果は、開発したモジュールが、外部偏光子/検光子を用いることなく偏波識別計測に適用可能であることを示している。

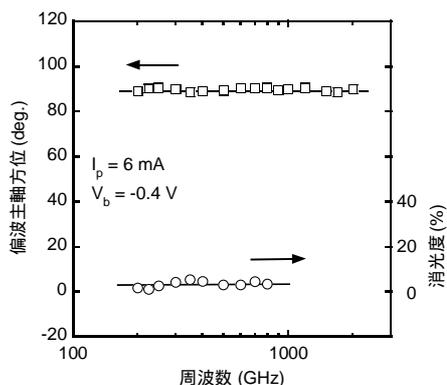


図3：開発したテラヘルツ波発生モジュールの偏波主軸方位と消光度の周波数依存性

(3) テラヘルツ波エリプソメトリーの実現

開発した「テラヘルツ波発生、及び検出モジュール」のエリプソメトリー測定への適用を検討した。まず、干渉の影響を避け試料を安定に固定する構成として、レンズを用いない上面入射型のエリプソメトリー測定系を構築した。そして、生体関連材料の主要構成要素である精製水をテストサンプルとして、周波数 200GHz においてエリプソメトリー測定を行い、外部偏光子/検光子を用いずに複素比誘電率の計測を実現した。またこの結果が、外部偏光子を用いた場合の測定値や解析計算値と整合することも確認した。

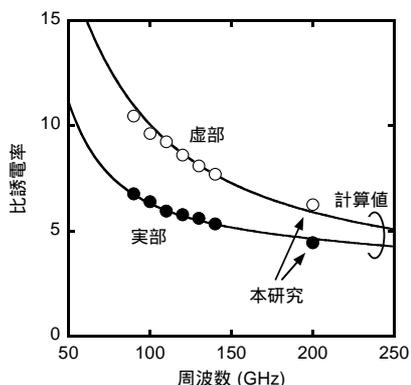


図4：開発した各モジュールを用いて測定した複素比誘電率（報告値との比較、実線は解析計算値）

これらの結果は、本研究で開発した各モジュールが、外部偏光子/検光子無しでも、テラヘルツ波エリプソメトリーに必要な良好な直線偏波特性を有していることを示して

おり、本研究の目標を達成することができた。

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)

Hiroshi Ito, Toshihide Yoshimatsu, Hiroshi Yamamoto, and Tadao Ishibashi: "Widely Tunable THz-Wave Emitter with Linear Polarization Characteristics Based on Antenna-Integrated UTC-PD" Proc. SPIE, vol. 9199 (2014) pp. 919908-1 - 919908-8. (査読無)

Hiroshi Ito, Toshihide Yoshimatsu, Hiroshi Yamamoto, and Tadao Ishibashi: "Photonic Terahertz-Wave Emitter Integrating Uni-Traveling-Carrier Photodiode and Self-Complementary Planar Antenna" Optical Engineering **53**, No. 3 (2014) pp. 031209-1 - 031209-7. (査読有)

Hiroshi Ito, Toshihide Yoshimatsu, and Tadao Ishibashi: "Broadband Photonic Terahertz-Wave Emitter Based on UTC-PD and Integrated Planar Antenna" Proc. SPIE, vol. 8846 (2013) pp. 88460F-1 - 88460F-10. (査読無)

Hiroshi Ito, Toshihide Yoshimatsu, Hiroshi Yamamoto, and Tadao Ishibashi: "Polarization-Sensitive Terahertz-Wave Detector Implementing Planar-Antenna-Integrated InP-Based Schottky Barrier Diode" Electron. Lett. **49**, No. 15 (2013) pp. 949-950. (査読有)

Hiroshi Ito, Toshihide Yoshimatsu, Hiroshi Yamamoto, and Tadao Ishibashi: "Broadband Photonic Terahertz-Wave Emitter Integrating UTC-PD and Novel Planar Antenna" Proc. SPIE, vol. 8716 (2013) pp. 871602-1 - 871602-8. (査読無)

Hiroshi Ito, Toshihide Yoshimatsu, Hiroshi Yamamoto, and Tadao Ishibashi: "Widely Frequency Tunable Terahertz-Wave Emitter Integrating Uni-Traveling-Carrier Photodiode and Extended Bowtie Antenna" Appl. Phys. Express **6**, No. 6 (2013) pp. 064101-1 - 064101-3. (査読有)

Hiroshi Ito, Yoshifumi Muramoto, Hiroshi Yamamoto, and Tadao Ishibashi: "Matching-Circuit-Integrated InGaAsP Schottky Barrier Diode for Zero-Biased Operation in the Sub-Millimeter-Wave Range" Jpn. J. Appl. Phys. **51**, No. 11 (2012) pp. 114101-1 - 114101-6. (査読有)

Hiroshi Ito, Yoshifumi Muramoto, and Tadao Ishibashi: "High-Sensitivity Sub-Millimeter-Wave Detector Module Implementing InP-Based Zero-Biased Schottky-Barrier Diode" Proc. SPIE, vol. 8496 (2012) pp. 84960K-1 - 84960K-8. (査読無)

[学会発表](計14件)

伊藤 弘:「単一走行キャリア・フォトダイオードを用いた偏波制御ミリ波・サブミリ波の発生と応用」, 電子情報通信学会第5回超高速光エレクトロニクス研究会、湯宿一番地(静岡県熱海市) 講演9。(招待講演)(2014.11.29発表)

Hiroshi Ito: "Widely Tunable Terahertz Wave Photomixer Based on Uni-Traveling-Carrier Photodiode" 2nd International Conference and Exhibition on Lasers, Optics and Photonics (Optics-2014), フィラデルフィア(アメリカ)(2014) 3-3。(招待講演)(2014.9.9発表)

Hiroshi Ito, Toshihide Yoshimatsu, Hiroshi Yamamoto, and Tadao Ishibashi: "Widely Tunable THz-Wave Emitter with Linear Polarization Characteristics Based on Antenna-Integrated UTC-PD" SPIE Optics and Photonics (Optical Engineering + Applications; Terahertz Emitters, Receivers, and Applications V, Conference OP231), サンディエゴ(アメリカ)(2014) 9199-8。(2014.8.17発表)

伊藤 弘、吉松俊英、山本 洋、石橋忠夫:「広帯域自己補対アンテナにおける共振モード」, 電子情報通信学会テラヘルツ応用システム研究会、沖縄県市町村自治会館(沖縄県那覇市) 講演8。(2014.8.7発表)

Hiroshi Ito: "Generation of Millimeter-/Sub-Millimeter-Waves Using Uni-Traveling-Carrier Photodiodes" Sixth International Symposium on Ultrafast Photonics Technologies (ISUPT), ロチェスター(アメリカ)(2013) 6-3。(招待講演)(2013.10.22発表)

Hiroshi Ito, Toshihide Yoshimatsu, Hiroshi Yamamoto, and Tadao Ishibashi: "Polarization-Sensitive Terahertz-Wave Detector Implementing Planar-Antenna-Integrated InP-Based Schottky Barrier Diode" International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2013), マインツ(ドイツ)(2013) Tu8-1。(2013.9.3発表)

Hiroshi Ito, Toshihide Yoshimatsu, and Tadao Ishibashi: "Broadband Photonic Terahertz-Wave Emitter Based on Planar-Antenna-Integrated UTC-PD" SPIE Optics and Photonics (Photonic Devices and Applications; Terahertz Emitters, Receivers, and Applications IV, Conference OP218), サンディエゴ(アメリカ)(2013) 8846-14。(招待講演)(2013.8.25発表)

伊藤 弘、吉松俊英、山本 洋、石橋忠夫:「アンテナ集積 SBD を用いた偏波識別用サブテラヘルツ波検出器」, 電子情報通信学会テラヘルツ応用システム研究会, pp. 1-2、北海道大学(北海道札幌市)。

(2013.8.6発表)

Hiroshi Ito, Toshihide Yoshimatsu, Hiroshi Yamamoto, and Tadao Ishibashi: "Broadband Photonic Terahertz-Wave Emitter Integrating UTC-PD and Novel Planar Antenna" SPIE Defence, Security and Sensing (Terahertz Physics, Devices, and Systems VII, Conference DS203), ボルチモア(アメリカ)(2013) 8716-1。(招待講演)(2013.4.29発表)

伊藤 弘、村本好史、山本 洋、石橋忠夫:「サブミリ波帯ゼロバイアス動作 InP 系 SBD モジュール」, 電子情報通信学会電子デバイス研究会、東北大学(宮城県仙台市), Vol.112 No.364 [ED2012-107], pp. 77-82。(2012.12.18発表)

伊藤 弘:「単一走行キャリア・フォトダイオードを用いたミリ波・サブミリ波の発生と応用」, 電子情報通信学会第5回超高速光エレクトロニクス研究会, pp. 1-2、ラフォーレ強羅(神奈川県箱根町)。(招待講演)(2012.12.8発表)

伊藤 弘:「UTC-PD を用いたテラヘルツ波の発生とその応用」, 日本学術振興会 テラヘルツ波科学技術と産業開拓第182委員会 第15回研究会, pp. 13-18、アクティビティー浜松コンgresセンター(静岡県浜松市)。(招待講演)(2012.10.19発表)

Hiroshi Ito, Yoshifumi Muramoto, Hiroshi Yamamoto, and Tadao Ishibashi: "High-Sensitivity Sub-Millimeter-Wave Detector Module Implementing InP-Based Zero-Biased Schottky-Barrier Diode" SPIE Optics and Photonics (Photonic Devices and Applications; Terahertz Emitters, Receivers, and Applications III, Conference OP218), サンディエゴ(アメリカ)(2012) 8496-19。(2012.8.13発表)

Hiroshi Ito, Hiroshi Yamamoto, and Makoto Noshiro: "Reflection-Geometry Measurement of Biological Materials using Photonically-Generated Millimeter-Waves" Asia-Pacific Microwave Photonics Conference (APMP 2012), コーピン京都(京都府京都市)(2012) ThC-3。(2012.4.26発表)

6. 研究組織

(1)研究代表者

伊藤 弘 (ITO HIROSHI)

北里大学・一般教育部・教授

研究者番号: 50525384

(2)連携研究者

山本 洋 (YAMAMOTO HIROSHI)

北里大学・一般教育部・講師

研究者番号: 00381640

(3)研究協力者

児玉 聡 (KODAMA SATOSHI)

石橋 忠夫 (ISHIBASHI TADAO)

村本 好史 (MURAMOTO YOSHIFUMI)

吉松 俊英 (YOSHIMATSU TOSHIHIDE)