

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月21日現在

機関番号：32607

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560360

研究課題名（和文）小型テラヘルツ波発生・検出モジュールの開発

研究課題名（英文）Development of compact terahertz-wave transceiver module

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

研究成果の概要（和文）：

平面型サーキュレーター回路（PCC）を新たに開発し、単一走行キャリア・フォトダイオード及びショットキーバリアダイオードと共に実装した、小型テラヘルツ波発生・検出モジュールを試作した。作製したモジュールを評価した結果、周波数 270GHz 付近において明確な共振特性（PCC による信号分離特性）を示すことを確認し、目標であったテラヘルツ波トランシーバーの機能を実現した。また、開発したモジュールを用い、270GHz において人体の生体（*in vivo*）イメージングを実現した。

研究成果の概要（英文）：

A newly-developed planar circulator circuit (PCC) is integrated with a uni-traveling-carrier photodiode and a Schottky barrier diode to construct a compact sub-terahertz-wave transceiver module. The frequency dependence of the detection sensitivity of the transceiver module showed a clear resonant at around 270 GHz with a circulation function due to the PCC, indicating that the fabricated module functioned properly as a transceiver. Using the fabricated transceiver, *in vivo* imaging of a human finger at 270 GHz is successfully demonstrated.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電子デバイス・電子機器

キーワード：UTC-PD、ショットキーバリアダイオード、サーキュレーター、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。すでに一部の計測機器が市販されているが、装置が大型（机程度）であるため、特に医療応用において必要となる「ベッドサイドで患者の様々な部位に測定装置を近づ

ける」ことが困難であった。

このような課題に対し、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)」を用いた新しい電磁波発生技術を用いることで、小型(手のひらサイズ)・軽量で、取り回しが容易な(柔軟性のある光ファイバーとバイアス線のみで接続された)計測機器を実現できる可能性がある。

また、生体に対するイメージングにおいて必要となる、反射型で小型の計測器を実現することも重要である。反射型構成では送受信波が同一光軸上を伝播するため、送受信波を分離するための「サーキュレーター」と呼ばれる部品が必要であるが、テラヘルツ帯における小型のサーキュレーターは技術的困難性のため、これまで実現されていなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、生命科学分野、特に医療応用に適した、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「テラヘルツ波発生・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平面型サーキュレーターを開発することが重要なポイントとなる。具体的な目標としては、モジュールの出力と感度、及び画像解像度を考慮して、300GHz 帯での動作実現を目指した。

3. 研究の方法

本研究では、以下の4つの項目を達成することで、目標の実現を目指した。

(1) テラヘルツ帯サーキュレーターの実現

小型筐体の実装可能な新たな平面型サーキュレーター回路(PCC)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、素子を作製して所望のサーキュレーター特性を実現する。

(2) 導波管入力型ショットキーバリアダイオード(SBD)検波器の実現

基本要素となる、導波管入力型実装に適したテラヘルツ帯動作SBDを作製すると共に、モジュールに実装して検波特性を評価し、集積化モジュールに実装するための部品技術を確立する。

(3) 導波管入出力型テラヘルツ波発生・検出モジュールの実現

信号源であるUTC-PD、検出器であるSBD、及びPCCを内蔵した、導波管入出力型小型モジュールを作製し、300GHz帯でのトランシーバ動作を実現する。

(4) 反射型イメージングの実現

作製したモジュールを用いて人体に対する反射型テラヘルツ波イメージングを実現する。

4. 研究成果

(1) 300GHz帯サーキュレーターの実現

テラヘルツ帯で動作可能な平面回路型サーキュレーター回路(PCC)として「180度ハイブリッド回路」(図1)を採用し、電磁界解析を用いて回路設計を行った結果、共振周波数約300GHzにおいてサーキュレーター動作を実現できる分布型回路構成法を明らかにした。これを元に、石英基板上にPCCを作製し、伝搬特性の評価を行った結果、共振周波数約270GHzにおいてサーキュレーター動作を実現した(図2)。

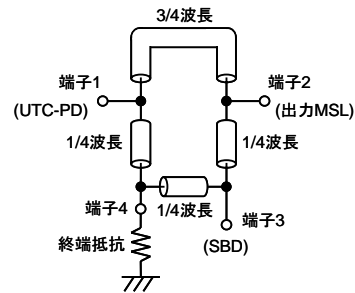


図1: 平面型サーキュレーターの回路図

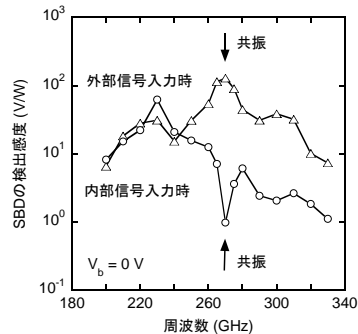


図2: 外部信号入力時と内部信号入力時のSBD検出感度の比較(周波数依存性)

図2は、外部信号が入力した場合とモジュール内部に実装したUTC-PDから信号を送出した場合の、モジュール内部に実装したSBDによる検出感度の周波数特性を比較したものであり、共振周波数である270GHzにおいて、外部信号に対する感度が極大を示す一方で、内部信号に対する感度が極小を示すという、PCCによる信号の選択性(信号分離)が実現されていることがわかる。このときの信号分離特性として、270GHzで約14.3dBと良好な値が得られた。

(2) 導波管入力型ショットキーバリアダイオード(SBD)検波器の実現

導波管実装に適した構成として整合回路を集積化したSBDを採用し、整合回路の最適設計を行うと共に、InP系材料を用いて素子の試作を行った。そして、試作したSBDを導

波管入力モジュールに実装して特性評価を行った結果、SBD モジュールは約 230GHz に感度のピークを持つことがわかった。また実験結果の解析から、この結果は SBD に内蔵した共振回路の素子パターン及び SBD の帯域特性に支配されていることを明らかにした。これらの結果を元に、新たな設計の SBD を試作・実装して特性評価を行った結果、SBD モジュールのピーク感度周波数を 300GHz 帯にまで向上させることができた。またこの結果は解析計算と良い一致を示した。

(3) 導波管入出力型テラヘルツ波発生・検出モジュールの実現

異種基板上に作製した UTC-PD と PCC との低損失な接続を実現するため、線路接続構成の最適化を検討した。まず高周波信号の線路伝播特性を実験的に検討し、線路基板の材料物性が伝播特性に及ぼす影響を明らかにした。これを元に、UTC-PD と PCC の接続構成を改良し、新たに設計した接続線路と UTC-PD を実装した導波管出力型 UTC-PD モジュールを試作して特性評価を行った結果、作製した接続構成が良好な伝播特性を有することを確認した。

この結果を基に、J バンド導波管出力型 UTC-PD モジュールの筐体構成をベースとして、テラヘルツ波発生・検出モジュールの構成を決定した。そして、試作した PCC、SBD、UTC-PD、及び筐体部材を用い、これら全てを実装した単一導波管入出力型電磁波発生・検出モジュールを試作し、周波数 270GHz において連続波を用いたトランシーバ動作を世界で初めて実現した(図3、図4)。

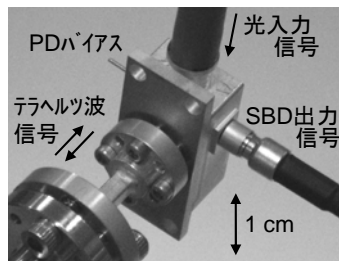


図3：開発したテラヘルツ波発生・検出モジュールの外観

また、試作したモジュールの詳細な特性評価から、集積化した状態の UTC-PD からのテラヘルツ波出力及び SBD の検出感度が広い信号強度範囲で高い線形性を持つことや、PCC の各ポート間の損失や分岐比の周波数依存性などの基本的性能を明らかにすると共に、個別素子の評価結果との比較から、集積化したトランシーバモジュールとしての特性改良指針を明らかにした。

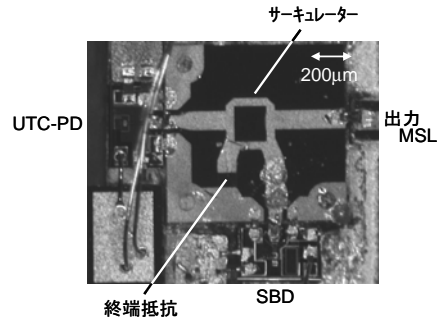


図4：開発したテラヘルツ波発生・検出モジュールの内部構造

(4) 反射型イメージングの実現

開発した「小型テラヘルツ波発生・検出モジュール」の反射型イメージングへの適用を検討した。まず、モジュールの基本特性を把握するため、試料として金属板スリットを用いたイメージングを行い、共振周波数からのずれと解像度との関係性を評価した結果、予想とは異なり約 40GHz と広い周波数範囲において実用的な解像度が得られることを見出した。またこの特性は、本研究で開発した平面型サーキュレーターの特性に起因していることを確認した。これらの結果を元に、周波数 270GHz において人体(指)の生体 (*in vivo*) イメージングを行い、良好なテラヘルツ波画像が取得できることを実証した(図5)。これらの結果は、本研究で開発したモジュールが、生体に対する反射型テラヘルツ波イメージングに適用可能であ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。

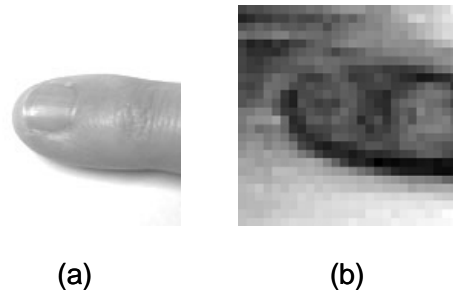


図5：測定に用いた指の写真(a)と開発したモジュールで測定したテラヘルツ波イメージ(b) (周波数：270GHz、測定範囲：24mm 角)

本研究で得られた成果は、実用的な形態の医療診断機器開発に向けた重要なステップとなるものであり、学術論文や国際会議における招待講演などの形で評価された。

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4件)

Hiroshi Ito, Hiroshi Yamamoto, Yoshifumi Muramoto, and Tadao Ishibashi: "Planar Circulator for Reflection-Geometry Sub-Terahertz-Wave Imaging" Jpn. J. Appl. Phys. **50**, No. 11 (2011) pp. 116603-1 - 116603-6. (査読有)

Hiroshi Ito, Hiroshi Yamamoto, Yoshifumi Muramoto, and Tadao Ishibashi: "Reflection-Geometry Sub-Terahertz-Wave Imaging for Biological Materials Using an Integrated Photonic Transceiver" Proc. SPIE vol. 8119 (2011) pp. 811902-1 - 811902-10. (査読無)

Hiroshi Ito, Kaoru Yoshino, Yoshifumi Muramoto, Hiroshi Yamamoto, and Tadao Ishibashi: "Sub-Terahertz-Wave Transceiver Module Integrating Uni-Traveling-Carrier Photodiode, Schottky Barrier Diode, and Planar Circulator Circuit" IEEE J. Lightwave Tech. **LT-28**, No. 24 (2010) pp. 3599-3605. (査読有)

Hiroshi Ito, Hiroshi Yamamoto, Tomofumi Furuta, and Tadao Ishibashi: "Generation and Propagation of Sub-Terahertz Pulse Signal using Waveguide Integrated InP/InGaAs Uni-Traveling-Carrier Photodiode" Jpn. J. Appl. Phys. **49**, No. 3 (2010) pp. 032402-1 - 032402-5. (査読有)

[学会発表](計8件)

Hiroshi Ito: "Generation of Continuous Millimeter-/Sub-Millimeter-Waves using Uni-Traveling-Carrier Photodiodes" 2012 RCIQE International Workshop for Green Electronics, Sapporo (2012) T3. (招待講演) (2012.3.6発表)

Hiroshi Ito, Hiroshi Yamamoto, Yoshifumi Muramoto, and Tadao Ishibashi: "Reflection-Geometry Sub-Terahertz-Wave Imaging for Biological Materials Using an Integrated Photonic Transceiver" SPIE Optics + Photonics (Photonic Devices + Applications; Terahertz Emitters, Receivers, and Applications II, Conference OP218), San Diego (2011) 8119-1. (2011.8.21発表)

Hiroshi Ito and Hiroshi Yamamoto: "Millimeter-/Terahertz-Wave Measurements for Biological Materials Using Photonically Generated Continuous Waves" General Assembly and Scientific Symposium of International Union of Radio Science (XXX URSI), Istanbul (2011) DAF2.8. (招待講演) (2011.8.19発表)

伊藤 弘、吉野 薫、村本好史、山本 洋、石橋忠夫:「サブテラヘルツ帯フォトニックトランシーバモジュールの開発」, 第 58

回応用物理学関係連合講演会 27a-BX-1、厚木、(2011.3.27発表)。

Hiroshi Ito: "Photonic Generation of Millimeter-/Terahertz-Waves using Uni-Traveling-Carrier Photodiodes" Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC10), Toyama (2010) DC3-1. (招待講演) (2010.9.26発表)

Hiroshi Ito, Kaoru Yoshino, Yoshifumi Muramoto, Hiroshi Yamamoto, and Tadao Ishibashi: "Sub-Terahertz-Wave Transceiver Module Integrating Uni-Traveling-Carrier Photodiode, Schottky Barrier Diode, and Planar Circulator Circuit" International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2010), Rome (2010) Tu-P.55. (2010.9.7発表)

Hiroshi Ito, Hiroshi Yamamoto, Tomofumi Furuta, and Tadao Ishibashi: "Generation and Propagation of Sub-Terahertz Pulse Signal using Waveguide Integrated InP/InGaAs Uni-Traveling-Carrier Photodiode" IEEE Photonics Society Winter Topicals 2010, Majorca (2010) TuA2.4. (2010.1.12発表)

伊藤 弘、山本 洋、古田知史、石橋忠夫:「InP 基板上に作製したコプレーナ線路におけるピコ秒パルス伝搬特性」, 第 70 回応用物理学学会学術講演会 8p-M-10、富山、(2009.9.8発表)。

[図書](計2件)

Tadao Nagatsuma and Hiroshi Ito, "High-Power RF Uni-Traveling-Carrier Photodiodes and Their Applications", in *Advances in Photodiodes* (分担), IN-TECH Open Access Publisher (2011) pp. 291-314, ISBN: 978-953-307-163-3.

伊藤 弘、シーエムシー出版、テラヘルツ波新産業:第4章、4-1節 (2011) pp. 57-62, ISBN: 978-4-7813-0289-8。

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・助教
研究者番号: 00381640

(3)研究協力者

NTT (吉野薫、村本好史、古田知史)
NTT エレクトロニクス (石橋忠夫)