

令和 6 年 5 月 14 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K04517

研究課題名（和文）集積型テラヘルツ波ヘテロダイン検出器の開発

研究課題名（英文）Development of integrated terahertz-wave heterodyne detector

研究代表者

伊藤 弘（ITO, Hiroshi）

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・特任研究員

研究者番号：50525384

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：異種基板上へのエピ層転写技術を利用し、平面回路型方向性結合器とフェルミレベル制御バリア（FMB）ダイオードとをモノリシック集積化したバランス型テラヘルツ波検出器を開発し、単一走行キャリアフォトダイオードと組み合わせて300GHz帯におけるヘテロダイン検波特性を評価した結果、方向性結合器の良好な方向性と、FMBダイオードとしてこれまでで最も低い雑音等価電力を実現し、「集積型テラヘルツ波ヘテロダイン検出器」の実現見通しを得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した集積型テラヘルツ波ヘテロダイン検出器は、従来部品よりも格段に小型化が可能であり、これまでテラヘルツ波技術の産業応用を阻害する要因であった部品コストやサイズの大幅な低減を可能にし、テラヘルツ波技術の利用範囲拡大に大きく貢献できるものと考えられる。また、雑音特性の大幅な改善も可能なことから、イメージングだけでなく様々な計測技術の特性向上に重要な役割を果たすものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：The epi-layer transfer technique was applied to fabricate an integrated terahertz-wave balanced mixer implementing a planar directional coupler and Fermi-level managed barrier diodes. The fabricated device was combined with a uni-traveling-carrier photodiode as a local oscillator for the heterodyne detection in 300-GHz band. It exhibited fairly good isolation between signal and LO input ports and an extremely low noise-equivalent-power, indicating that fabricated device is a promising solution for a highly-sensitive and compact integrated terahertz-wave heterodyne detector.

研究分野：電子工学

キーワード：テラヘルツ ヘテロダイン検波 小型モジュール

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ波(概ね 100GHz から 10THz 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、セキュリティ検査、医療診断、製品検査など、国民の生活に直結する重要な応用に向けた研究開発が進められている。なかでも、空港やイベント会場におけるセキュリティ検査技術への要求が高まっている。しかし、従来の電磁波イメージング技術では数十 GHz 以下の信号を用いていたため、画像分解能が低いという課題があった。また、周波数を高くした場合には、照明用の十分な信号出力が得られないという課題もあった。一方、照明が不要な「パッシブ・イメージング」方式を用いれば、システムを大幅に簡易・低コスト化できる。そのためには、従来よりも格段に高感度な検出技術が必要となる。しかし、代表的な高感度検出技術である「ヘテロダイン検波」方式を用いた場合、従来の部品を用いた構成では、高価でバルキーな部品を多数使用する必要があるため、依然としてサイズやコストの面で大きな課題があった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、これまでに無かった小型・軽量で高感度な検出器を新たに開発することである。そのために、検出器と LO 信号源を平面回路で接続し、単一筐体に集積するという手法を用いることで、従来部品では困難であった小型で取り回しの容易な「集積型テラヘルツ波ヘテロダイン検出器」を実現する。

3. 研究の方法

本研究では、検出器にフェルミレベル制御バリア(FMB)ダイオード、LO 信号源に単一走行キャリア・フォトダイオード(UTC-PD)を用い、入力信号と LO 信号を合波すると共に不要信号の放射を防ぐための方向性結合器を、基板上に作製した小型平面回路で構成する。これらの部品は全て信号波長程度以下のサイズで作製できるため、数 mm 程度の寸法で全機能を集積化できる。また、平面回路の特徴として、同一構成を繰り返し配置することで規模拡大にも対応できるため、将来のアレイ化にも優位な構成となる。さらに、本研究計画で用いる FMB ダイオードは無バイアス動作に適しており、UTC-PD も無バイアス動作が可能なることから、これらの組み合わせにより、検出器への電源供給を不要とすることも可能となる。

本研究では、以下の 4 つの点を目標とした。

(1) 平面回路型方向性結合器の実現

300GHz 帯で動作する平面回路型方向性結合器を開発する。性能目標は、方向性 20dB 以上、挿入損失 5dB 以下とする。

(2) 平面回路集積用検出器、及び LO 用発振器の実現

300GHz 帯で動作する FMB ダイオードと UTC-PD を作製し、他の要素部品との集積化を実現する。また、集積化した構成で、所望のヘテロダイン検波特性を実現する。

(3) 導波管入力型小型モジュールの実現

前述の各部品を内蔵した、Jバンド(帯域 220-325GHz)導波管入出力型小型モジュールを実現する。性能目標は、300GHz 帯における NEP $1\text{E}-15$ W/Hz 以下とする。

(4) パッシブ・テラヘルツイメージングの実現

作製したモジュールを用いたパッシブ・イメージング系を構築し、300GHz 帯における撮像において S/N 比 10dB 以上を実現する。

4. 研究成果

(1) 平面回路型方向性結合器の実現

平面回路型方向性結合器に関しては、最適な回路形式について比較検討を行った結果、90 度ハイブリッド回路を採用することとした。また、90 度ハイブリッド回路の特徴を最大限利用するため、バランス型検出器の構成も採用することとした。この方針に従い、電磁界解析によるパラメータの最適化を行い、試作用のパターンを決定した。そして、これらを用いてプロセスを実施し、素子を作製した。今回用いたプロセスではチップサイズに制約があったため、高周波回路部分を一体化して作製し、IF 部分は別チップの形態とした(図 1)。作製した素子の特性評価結果から、本研究で用いた 90 度ハイブリッド回路が良好な方向性(300GHz で -15dB 程度)を有していることを確認した(図 2)。また、挿入損失も 3dB 程度に収まっていることも確認した。一方、回路をハイブリッド構成にしたことによる特性面での課題も明らかになったため、IF 回路も含めた全要素の集積化を検討した。その結果、プロセス及び回路形式を改良することで、集積型バランス型検出器の作製プロセスを構築し、再度電磁界解析によりパラメータを最適化して、改良版の試作に反映させた。素子特性評価の結果、集積した素子でも安定した特性と信号分離動作が得られることを確認した。

(2) 平面回路集積用検出器、及び LO 用発振器の実現

検出器に関しては、平面回路型方向性結合器とのモノリシック集積化を実現するため、新たに

素子用のエピ層を異種基板上に転写する技術の検討を行い、FMB ダイオードの SiC 基板上への転写を実現した。これを用いて素子作製プロセスを実施し、バランス型検出器を作製した(図1)。この素子を、導波管 2 入力型の筐体(図3)に実装して特性評価を行った結果、300GHz 帯における雑音等価電力 (NEP) として $2\text{E}-19 \text{ W/Hz}$ と、これまで FMB ダイオードで得られているなかで最も低い値を実現した(図4)。これは、今回導入した 90 度ハイブリッド回路が良好に動作していると同時に、バランス型検出器が優れた検波特性を有していることを示している。

LO 用発振器に関しては、今回確立したエピ層転写技術を用いることで、特性上も実装技術上も優位な素子を作製できると考えられるが、本研究ではリソースが限定されていたこともあり、筐体内に実装するには至らなかった。しかし、個別のモジュールを用いて特性評価を実施した結果、目標とする機能を実証することができた。

(3) 導波管入力型小型モジュールの実現

モジュールの実現に関しては、J バンド(帯域 220-325GHz)で動作する導波管 2 入力型の小型筐体を新たに設計し、部材作製を行った。これを用いて、試作したバランス型検出器を実装してモジュール(図3)を作製し、ヘテロダイン検波特性の評価を行った。その結果、300GHz 帯における NEP として $2\text{E}-19 \text{ W/Hz}$ (図4)を実現し、当初計画の目標を大幅に上回ることができた。

(4) パッシブ・テラヘルツイメージングの実現

イメージングの実現に関しては、新たに XY ステージを導入するなど、パッシブ・イメージング系の構築を進めたが、時間的な制約も含め撮像の実現には至らなかった。今後検討を継続することで、300GHz 帯における撮像の実現を目指していきたい。

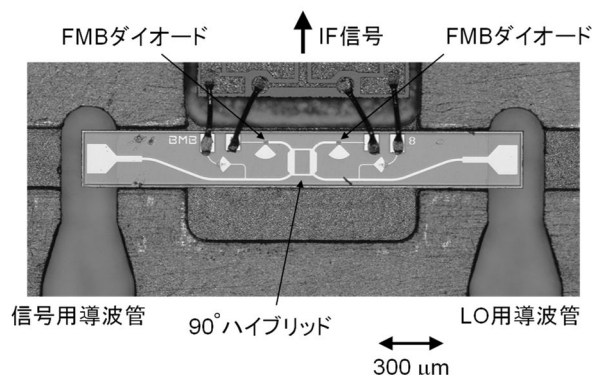


図1：バランス型検出器の写真(実装状態)

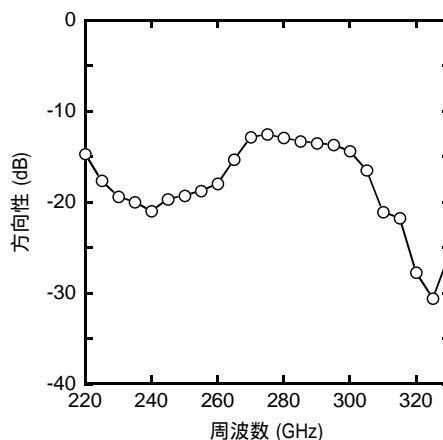


図2：平面回路型方向性結合器の方向性評価結果

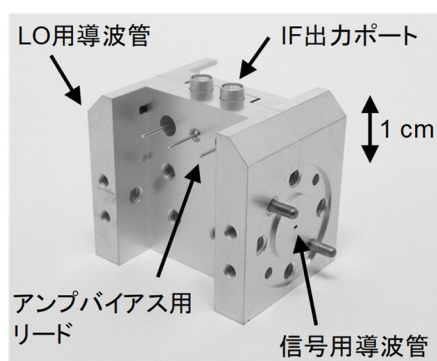


図3：導波管 2 入力型モジュールの写真

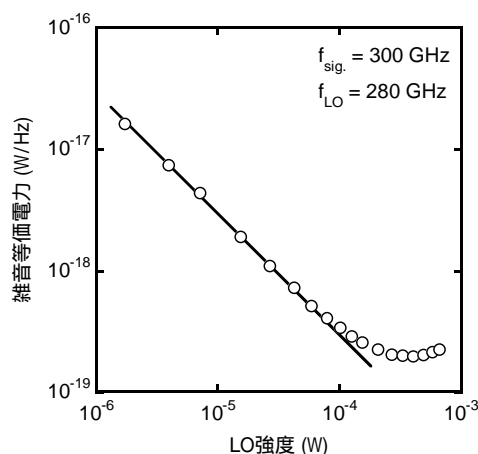


図4：NEP の LO 強度依存性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 H. Ito, N. Shibata, T. Nagatsuma, and T. Ishibashi	4. 巻 19
2. 論文標題 Terahertz-Wave Sub-Harmonic Mixer Based on Silicon Carbide Platform	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Electron. Express	6. 最初と最後の頁 20220414-1 - 4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/elex.19.20220414	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 H. Ito and T. Ishibashi	4. 巻 12230
2. 論文標題 Low Noise Terahertz-Wave Detection by Fermi-Level Managed Barrier Diode	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. SPIE	6. 最初と最後の頁 1223004-1 - 12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2635218	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Ito and T. Ishibashi	4. 巻 14
2. 論文標題 Low-Noise Sub-Harmonic-Mixing in 300-GHz Band by Fermi-Level Managed Barrier Diode	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Express	6. 最初と最後の頁 104001-1 - 4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1882-0786/ac2213	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Ito, N. Shibata, T. Nagatsuma, and T. Ishibashi	4. 巻 15
2. 論文標題 Terahertz-Wave Detector on Silicon Carbide Platform	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Express	6. 最初と最後の頁 026501-1 - 4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1882-0786/ac4a13	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 伊藤 弘、石橋忠夫	4. 巻 J104-C
2. 論文標題 テラヘルツ検出器の新展開：フェルミレベル制御バリアダイオード	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌 C	6. 最初と最後の頁 210-217
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Ito and T. Ishibashi	4. 巻 56
2. 論文標題 Low-Local-Oscillator-Power Sub-Harmonic Mixing in 300-GHz Band by Fermi-Level Managed Barrier Diode	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Electron. Lett.	6. 最初と最後の頁 1326-1328
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1049/el.2020.2307	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Ito and T. Ishibashi	4. 巻 55
2. 論文標題 Broadband Heterodyne Detection of Terahertz-Waves Using Rectangular-Waveguide-Input Fermi-Level Managed Barrier Diode Module	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Electron. Lett.	6. 最初と最後の頁 905-907
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1049/el.2019.1803	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Ito and T. Ishibashi	4. 巻 11088
2. 論文標題 Highly Sensitive Terahertz-Wave Detection by Fermi-Level Managed Barrier Diode	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. SPIE	6. 最初と最後の頁 1108807-1 - 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2528250	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 iroshi Ito, Yuma Kawamoto, Takahiro Ohara, Tadao Nagatsuma, and Tadao Ishibashi	4. 巻 20
2. 論文標題 Low-Noise Balanced Mixer for 300-GHz Band Based on Fermi-Level Managed Barrier Diode on SiC Platform	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEICE Electron. Express	6. 最初と最後の頁 20230395-1 - 4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/elex.20.20230395	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計19件 (うち招待講演 15件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 H. Ito and T. Ishibashi
2. 発表標題 Low Noise Terahertz-Wave Detection by Fermi-Level Managed Barrier Diode
3. 学会等名 SPIE Optics and Photonics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤 弘、石橋忠夫
2. 発表標題 低雑音テラヘルツ波検出器：フェルミレベル制御バリアダイオード
3. 学会等名 応用物理学会 光波センシング技術研究会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤 弘、石橋忠夫
2. 発表標題 低雑音THz波検出器：フェルミレベル制御バリアダイオード
3. 学会等名 物理学会秋期学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤 弘、石橋忠夫
2. 発表標題 THz波フォトミキサ・THz波検出器の研究開発
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 H. Ito and T. Ishibashi
2. 発表標題 Low-Noise Terahertz-Wave Detector: Fermi-Level Managed Barrier Diode
3. 学会等名 International Symposium on Future Trends of Terahertz Semiconductor Technologies (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤 弘、石橋忠夫
2. 発表標題 フェルミレベル制御バリアダイオードを用いた低雑音テラヘルツ波検出
3. 学会等名 電子情報通信学会ED/THz合同研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤 弘、石橋忠夫
2. 発表標題 テラヘルツ波検出器の実装技術：フェルミレベル制御バリアダイオード
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤 弘、柴田紀彦、永妻忠夫、石橋忠夫
2. 発表標題 SiCプラットフォームを用いたTHz波検出器の提案
3. 学会等名 応用物理学会春期学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Ito and T. Ishibashi
2. 発表標題 Low-LO-Power Sub-Harmonic Mixing of Terahertz-Waves by Fermi-Level Managed Barrier Diode
3. 学会等名 International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤 弘、石橋忠夫
2. 発表標題 テラヘルツ波検出素子の新展開：フェルミレベル制御バリアダイオード
3. 学会等名 電子情報通信学会LQE/R/OPE/CPM/EMD合同研究会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤 弘
2. 発表標題 広帯域・低雑音テラヘルツ波検出器：フェルミレベル制御バリアダイオード
3. 学会等名 テラヘルツシステム応用推進協議会 技術部会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Ito and T. Ishibashi
2. 発表標題 40-GHz-Bandwidth Heterodyne Detection of Terahertz-Waves by Waveguide-Input Fermi-Level Managed Barrier Diode Module
3. 学会等名 International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Ito and T. Ishibashi
2. 発表標題 Highly Sensitive Terahertz-Wave Detection by Fermi-Level Managed Barrier Diode
3. 学会等名 SPIE Optics and Photonics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Ito
2. 発表標題 Low-Noise Heterodyne Detection of Terahertz-Waves by Fermi-Level Managed Barrier Diode
3. 学会等名 EMN Meeting on Terahertz (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤 弘、石橋忠夫
2. 発表標題 テラヘルツ波検出素子の新展開：フェルミレベル制御バリアダイオード
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroshi Ito
2. 発表標題 Low-Noise Terahertz-Wave Detector: Fermi-Level Managed Barrier Diode
3. 学会等名 International Conference on Quantum Engineered Sensing and Information Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroshi Ito, Yuma Kawamoto, Takahiro Ohara, Tadao Nagatsuma, and Tadao Ishibashi
2. 発表標題 Fundamental Balanced Mixer Module for 300-GHz Band Based on Fermi-Level Managed Barrier Diode on SiC Platform
3. 学会等名 International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroshi Ito, Yuma Kawamoto, Takahiro Ohara, Tadao Nagatsuma, and Tadao Ishibashi
2. 発表標題 Broadband Fundamental Mixer for 300-GHz Band Based on Fermi-Level Managed Barrier Diode on SiC Platform
3. 学会等名 Asia-Pacific Microwave Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤 弘、永妻忠夫、石橋忠夫
2. 発表標題 フェルミレベル制御バリアダイオードを用いた低雑音テラヘルツ波検出器
3. 学会等名 電子情報通信学会マイクロ波テラヘルツ光電子技術研究会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 伊藤 弘、他	4. 発行年 2022年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 317
3. 書名 テラヘルツ波産業創成の課題と展望	

1. 著者名 伊藤 弘、他	4. 発行年 2021年
2. 出版社 化学同人	5. 総ページ数 200
3. 書名 赤外線の利用	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------