

令和 2 年 6 月 3 日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05092

研究課題名（和文）光コムを用いたテラヘルツ信号源安定化技術の開発

研究課題名（英文）Development of techniques for stabilization of THz sources using optical combs

研究代表者

諸橋 功（MOROHASHI, Isao）

国立研究開発法人情報通信研究機構・未来ICT研究所フロンティア創造総合研究室・主任研究員

研究者番号：40470059

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、光周波数コムおよび電気光学サンプリング法を用いたテラヘルツ帯信号源デバイスの周波数安定化技術の開発を目的として実施し、テラヘルツ帯信号源の安定化に必要な検出感度および帯域を実現、Gunn発振器の周波数安定化を実証、およびテラヘルツ計測システムを小型化するためのテラヘルツ波プローブを用いた100GHz帯テラヘルツ波検出を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本手法によるテラヘルツ帯周波数/スペクトル計測は、高い周波数精度を持つマイクロ波信号に対してトレーサブルな測定手法であるため、テラヘルツ波の周波数を高い精度で決定できる。したがって、本研究の成果を用いることにより、テラヘルツ帯信号源を高度に安定化することができ、近年開発が進んでいる量子カスケードレーザーや共鳴トンネルダイオードなどのテラヘルツ帯信号源デバイス開発の計測・制御技術となり得る。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is development of techniques for stabilization of terahertz source using optical frequency combs and electro-optic sampling. In this work we have realized three terms: (i) improvement of detection sensitivity and bandwidth, (ii) demonstration of frequency stabilization of a Gunn oscillator, and (iii) demonstration of terahertz detection using ultra-compact probe.

研究分野：テラヘルツフォトンクス

キーワード：テラヘルツ 光コム

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

これまでテラヘルツ波は、非破壊・非接触検査や2D/3Dイメージングを中心に産業応用が進んでおり、またそれ以外にも、分光計測やガスセンシングなどの研究も盛んに行われている。これらの応用では、比較的ブロードな吸収特性を持つ試料を測定対象にしていたため、計測システムに対する周波数精度の要求はそれほど高くはなかった。しかしながら、テラヘルツ帯超高速無線通信や成層圏などの非常に低圧な環境でのガスセンシングでは、高い周波数精度の計測や狭線幅の信号源が要求される。テラヘルツ帯の発振器としては、ガンダイオードや共鳴トンネルダイオード、量子カスケードレーザー等があるが、これらのデバイスはフリーランニングにおいて数MHz程度の線幅を持つため、上述の応用で要求されるkHz以下の分解能を満足しない。そのため、テラヘルツ帯信号源デバイスの周波数安定化技術の開発が求められる。

近年のデバイス技術の進展により、テラヘルツ周波数領域で動作するショットキーバリアダイオードハーモニックミキサーが実現しており、テラヘルツ波領域においてもヘテロダイン法を用いた周波数安定化が可能となっている。しかしながら、ショットキーバリアダイオードは素子ごとに周波数帯域が決まっているため、対象とする周波数帯に応じて高価なシステムを個別に用意する必要があるという難点がある。一方、フォトリソによる周波数計測法としては、電気光学効果を用いたスペクトル計測法があり、マイクロ波帯からテラヘルツ帯までカバーするヘテロダイン検出法として有望である。

2. 研究の目的

本研究は、光周波数コムおよび電気光学サンプリング法を用いたテラヘルツ信号源デバイスの周波数安定化技術の開発を目的としたものであり、 10^{-13} オーダーの高い周波数精度を持つ光コムを簡便に発生できる変調器ベース光コム発生器およびテラヘルツ波の広帯域検出が可能な電気光学サンプリング法によるヘテロダイン検出を用いたテラヘルツ信号源の周波数安定化技術の開発を実施した。さらに、システムの小型化を目指し、電気光学サンプリング法に基づく小型テラヘルツ波プローブを用いたテラヘルツ波検出技術の開発を行った。

本研究では、以下の点に主眼を置いた。

- (1) 本テラヘルツ波検出法において、テラヘルツ信号源の安定化に必要な検出感度および帯域を実現
- (2) 上記の成果を基に、Gunn発振器の周波数安定化を実証
- (3) システムの小型化に向け、テラヘルツ波プローブを用いたテラヘルツ波検出を実証

3. 研究の方法

本研究では、マッハツェンダー変調器(MZM)ベース光コム発生器に電気光学サンプリング法を組合せた系を用いて実証実験を実施した。テラヘルツ信号源には主にGunn発振器を用い、100GHz帯での実証を行った。テラヘルツ信号源の周波数安定化の実証実験では、電気光学サンプリング系から出力された信号を位相同期回路(PLL)を介してテラヘルツ信号源デバイスにフィードバックすることにより行った。テラヘルツ波プローブを用いたテラヘルツ波検出の実証に関しては、光ファイバーアセンブリ技術により小型化したプローブを用いて実施した。

4. 研究成果

(1) 検出感度および検出帯域の向上

図1に本研究で構築したテラヘルツ信号源周波数計測システムを示す。Gunn発振器から発生された100GHz帯テラヘルツ波を軸外し放物面鏡で集光してEO結晶に入射した。変調器型光コム発生器で発生された光コムは、テラヘルツ波と同軸にEO結晶に入射されてテラヘルツ波による変調を受けた後、バランス検出器で検出された。ここで、光コムはテラヘルツ波との周波数差に相当する中間周波数(IF)信号にダウンコンバージョンされる。このIF信号の周波数(スペクトル)を計測することにより、光コムの周波数精度と同等の精度でテラヘルツ波の周波数を測定できる。

Gunn発振器は、PLLによる周波数安定化することでHz以下の線幅にすること

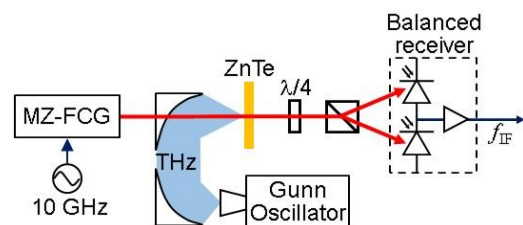


図1 テラヘルツ光源の周波数安定化システム

ができるが、フリーランニング状況下では数kHz程度の線幅を持ち、かつ数MHz程度の周波数ドリフトがある。これにより、スペクトルのピーク強度は30dB程度劣化する。これまでの我々の研究では、信号対雑音比(SNR)として35dB程度が得られていたが、これでは本手法を用いたテラヘルツ信号源の周波数安定化には不十分であった。したがって、検出感度の向上は重要な課題であった。EOサンプリングにおける検出感度は、センサーとして用いるEO結晶のパラメータに大きく依存するため、まず電気光学結晶の選定を行った。その結果、ZnTe結晶が最も高い検出効率を得られることが明らかになった。しなしながら、EO結晶の最適化のみでは十分なSNRが得られなかったため、光コムを2倍波に変換することにより、SNR向上を図った。波長変換素子に導波路構造周期分極反転LiNbO₃(PPLN)結晶を用いた。これにより、波長1550nmの基本波の光コムに対して、775nmの倍波光コムが得られた。この倍波光コムを用いてテラヘルツ波検出を行った結果を図2に示す。波長を775nmに変換したことで、テラヘルツ波検出におけるSNRが50dB程度に改善され、周波数安定化に十分なSNRが得られた。

Gunn発振器の周波数安定化を行うには、上述のフリーランニング下での線幅およびドリフトをカバーし、かつ適切なオフセット周波数を設定する必要があるため、十分なIF信号の帯域を確保する必要がある。そこで、バランス検出器の最適化を行った。図3に2種類の検出器の帯域におけるテラヘルツ検出帯域の比較を示す。本方式の検出帯域は、バランス検出器の検出帯域でほぼ決まることが明らかになり、帯域が80MHzのバランス検出器を用いたとき、テラヘルツ波信号源の周波数安定化に必要な100MHz以上の検出帯域が得られることが明らかになった。

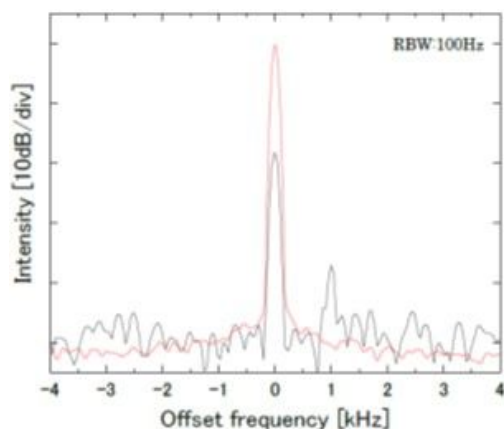


図2 基本波(1550nm)および倍波(775nm)を用いたテラヘルツ検出の結果。黒線：基本波、赤線：倍波。

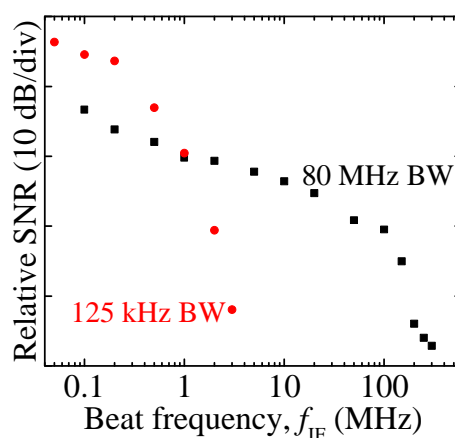


図3 バランス検出器の帯域に対するテラヘルツ検出帯域の比較

(2) Gunn発振器の周波数安定化

テラヘルツ波信号源の周波数安定化に対して十分な感度および帯域が得られたことから、Gunn発振器の周波数安定化の実証実験を行った。図4に周波数安定化システムの概略を示す。EOサンプリング系から出力されたIF信号をエラー信号としてPLL回路に入力した。PLL回路ではビート信号と70MHzの参照信号との比較を行い、その差分を補償するようにGunn発振器の駆動電圧を制御する。これにより、Gunn発振器の周波数は、光コムの周波数にロックされる。図5に周波数ロックされたテラヘルツ波のスペクトルを示す。Gunn発振器は、フリーランニング状態において数kHz程度の線幅を持つが、周波数安定化により、1Hz以下(スペクトラムアナライザの周波数分解能以下)に安定化することに成功した。

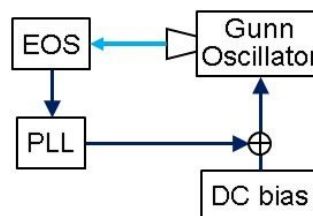


図4 PLLを用いたテラヘルツ光源の周波数安定化システム

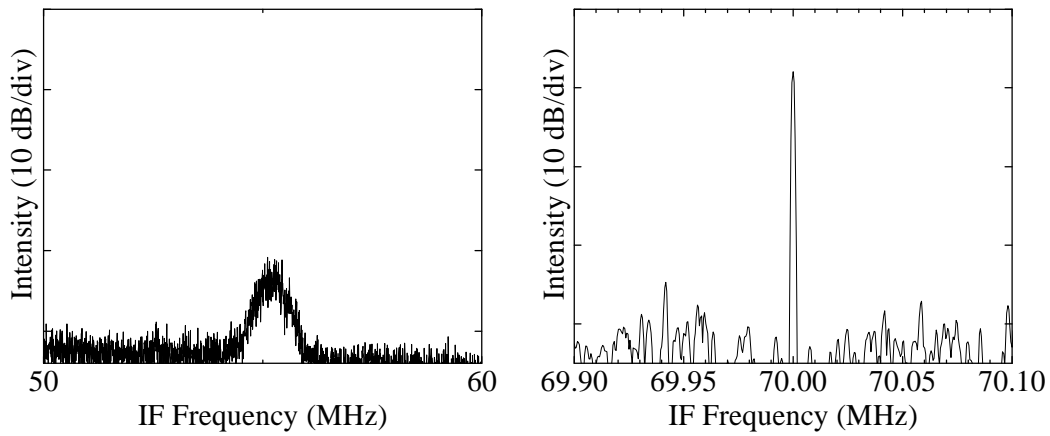


図5 Gunn発振器のフリーランニング時（左）および位相安定化後のスペクトル（右）

(3) テラヘルツ波プローブを用いたテラヘルツ波検出

テラヘルツ波検出システムの小型化を目指し、テラヘルツ波プローブを用いたテラヘルツ波検出の実証を行った。図6に本研究で開発したテラヘルツ波プローブを示す。本テラヘルツ波プローブは、EO結晶と光ファイバーアレイで構成されており、 $1.55\ \mu\text{m}$ 帯で動作する。プローブ先端部のサイズは、幅2 mm、高さ1 mm、長さ5 mmである。光ファイバーアレイは16チャンネルの偏波保持ファイバーとなっており、先端部にEO結晶が取り付けられている。本プローブでは、ZnTe結晶を用いており、EO結晶の一方の端面にはプローブ光に対する無反射（AR）コーティング、他方の端面には高反射（HR）コーティングを施している。テラヘルツ波はHRコーティング側から入射されるが、両コーティングのテラヘルツ帯での吸収は小さいため、テラヘルツ波はEO結晶内に透過する。一方、プローブ光は、ARコーティング側から入射され、HRコーティングで反射された後、テラヘルツ波による変調を受け、同じチャンネルの光ファイバーに戻る。その後、プローブ光は偏光ビームスプリッターで偏光分離され、フォトダイオード対で差動検出される。

図7に検出されたテラヘルツ波のスペクトルを示す。ここでは、本テラヘルツ波プローブの性能を示すため、Gunn発振器を位相同期ループで104 GHzの発振周波数に固定した。観測された信号は、200 kHzに位置し、光コム周波数間隔から求められる周波数とも一致した。線幅はスペクトラムアナライザの分解能（1 Hz）以下であった。したがって、本方式によりテラヘルツ波の周波数を高い精度で観測できることが示された。

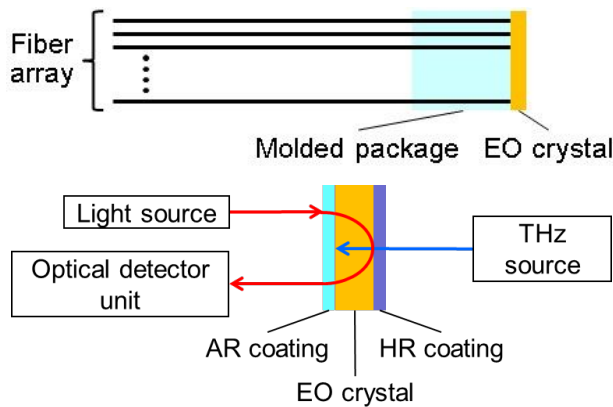


図6 テラヘルツ波プローブの概要

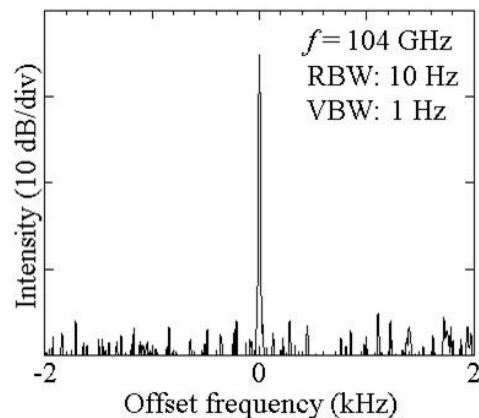


図7 テラヘルツ波プローブで検出されたテラヘルツ波のスペクトル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Isao Morohashi, Norihiko Sekine, Akifumi Kasamatsu, Iwao Hosako	4. 巻 -
2. 論文標題 Detection of Optically-generated THz Radiations by EO Sampling Using Modulator-based Optical Comb Source	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of PIERS 2019 in Rome	6. 最初と最後の頁 1504 - 1506
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/PIERS-Spring46901.2019.9017319	査読の有無 無
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 杉山卓也, 諸橋功, 小川洋, 片山郁文, 関根徳彦, 笠松章史, 竇迫巖	4. 巻 J102-C
2. 論文標題 40GHzモード同期半導体レーザを用いたミリ波帯周波数計測	5. 発行年 2019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 290-291
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 Morohashi Isao, Katayama Ikufumi, Kirigaya Mayu, Irimajiri Yoshihisa, Sekine Norihiko, Hosako Iwao	4. 巻 44
2. 論文標題 High precision frequency measurement of terahertz waves using optical combs from a Mach-Zehnder-modulator-based flat comb generator	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 487-487
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1364/OL.44.000487	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 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件／うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Isao Morohashi, Norihiko Sekine, Akifumi Kasamatsu, Iwao Hosako
2. 発表標題 Full W-band Frequency Measurement of THz Waves by Electro-Optic Sampling Using Modulator-Based Optical Comb Source
3. 学会等名 CLEO 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Isao Morohashi, Norihiko Sekine, Akifumi Kasamatsu, Iwao Hosako
2. 発表標題 Detection of Optically-Generated THz Radiations by EO Sampling Using Modulator-Based Optical Comb Source
3. 学会等名 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS2019 in Rome) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Isao Morohashi, Norihiko Sekine, Akifumi Kasamatsu, Iwao Hosako
2. 発表標題 Heterodyne Detection of THz Waves by Electro-Optic Sampling Using a Modulator-Based Optical Comb Source Toward Frequency Stabilization of THz Sources
3. 学会等名 3rd PEM International Workshop in Ise (PEM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Isao Morohashi, Norihiko Sekine, Iwao Hosako
2. 発表標題 Precise frequency measurement of THz Radiations Using Ultra-Compact Electro-Optic Probe
3. 学会等名 The 40th Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Isao Morohashi, Norihiko Sekine, Akifumi Kasamatsu, Iwao Hosako
2. 発表標題 Evaluation of performance on THz detection by photonic down-conversion using optical combs
3. 学会等名 5th Riken-NICT Joint Workshop on Terahertz Technology (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 諸橋功, 入交芳久, 菅野敦史, 川上彰, 山本直克, 関根徳彦, 笠松章史, 竇迫巖
2. 発表標題 THz帯無線通信応用のための光コムベース信号源を用いた3THz帯信号生成
3. 学会等名 マイクロ波・ミリ波フォトニクス研究会 (MWP)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 諸橋功, 関根徳彦, 笠松章史, 竇迫巖
2. 発表標題 変調器型光コム発生器を用いた電気光学サンプリング法によるテラヘルツ周波数計測における測定帯域の評価
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Isao Morohashi, Yoshihisa Irimajiri, Motoaki Kumagai, Akira Kawakami, Takahide Sakamoto, Norihiko Sekine, Akifumi Kasamatsu, and Iwao Hosako
2. 発表標題 Simultaneous Phase-Locking of Quantum Cascade Lasers Using Multi-Frequency THz Source System Composed of MZM-Based Flat Comb Generator
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro Optics (CLEO 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Isao Morohashi, Norihiko Sekine, Akifumi Kasamatsu, and Iwao Hosako
2. 発表標題 Detection of Continuous Wave THz Radiations at 100 and 600 GHz Using Ultra-Compact Electro-Optic Probe
3. 学会等名 The 42th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 諸橋 功, 関根 徳彦, 竇迫 巖
2. 発表標題 超小型電気光学プローブを用いた連続波テラヘルツ信号の検出
3. 学会等名 電子情報通信学会 マイクロ波・ミリ波フォトニクス研究会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔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