

平成 26 年 5 月 26 日現在

機関番号：24403

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24654048

研究課題名(和文)マルチビームTHz帯ヘテロダイン検出器のためのQCレーザーの局部発振波応用

研究課題名(英文)Application development of QC laser for THz band multi-beam heterodyne receiver

研究代表者

前澤 裕之(Hiroyuki, Maezawa)

大阪府立大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00377780

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：1-10THz帯には星間ガスや惑星大気からの様々なスペクトル線が分布する。今後、観測時間の限られるTHz帯ヘテロダイン天文観測を強力に推進するためには、THz検出器のマルチビーム化が重要となる。そのためには量子カスケードレーザー(QCL)の局部発振器応用、特にQCLの周波数安定化が重要な鍵を握る。本研究では、我々の準光学型超伝導NbTiN-HEBミキサに、逓倍型固体発振器によるTHz帯基準信号と周波数フリーランの入射信号を照射してビート信号を取り出し、これを位相比較することで、フリーランのTHz波の位相を高精度に直接制御する周波数安定化システムを開発した。

研究成果の概要(英文)：A certain portion of spectral lines from gas species in interstellar mediums, and planetary atmospheres lies in the 1-10 THz frequency band. In the light of analyzing these signals, heterodyne spectroscopy in the field of radio astronomy provides a high frequency resolution that allows us to study the physical and chemical conditions. However, astronomy in the 1-10 THz band has been long unexplored because of the lack of good observing sites and availability of high-sensitivity heterodyne receivers operating in this frequency range. One of the key aspects of future THz-band radio astronomy is the high efficient observations with multibeam receivers. Quantum cascade lasers with output powers in the sub-mW range operating at the 1-10 THz bands are potential candidates as local oscillators for multibeam receivers. In this study, we developed a PLL system to phase-lock such a free running THz-band signal directly by utilizing a superconducting NbTiN-HEB mixer.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：宇宙物理学 地球惑星科学 ヘテロダイン分光 検出器 超伝導デバイス テラヘルツ 量子カスケードデバイス 位相同期回路

## 1. 研究開始当初の背景

1-10THz帯には、星形成領域や原始惑星系内部の情報をもつ高励起輝線や、銀河・星間雲の進化・形成過程で冷却源として重要な役割を果たすプラズマや原子のガス、その他惑星大気など様々な重要なスペクトル線が分布している。電波天文学におけるヘテロダイン分光の手法は、これらのガスの視線方向上の速度成分の分離を可能にし、そこでの物理状態や化学組成について詳細な重要を与えてくれる。

しかし、この波長帯の分光観測は、電波と赤外の技術の狭にあり未開拓となっている。これは第一に、電波天文観測で広く利用されてきた超伝導SISミキサが動作せず、ヘテロダイン検出器が発展途上にあるためである。我々は新素材NbTiN超伝導化合物の高確度薄膜化制御と微細化技術を確立し、ホットエレクトロンボロメーターミキサ(HEBM)と呼ばれる次世代のTHzヘテロダイン検出素子を開発し、世界トップクラスの感度を実現しつつある。もう一つの問題は、THz帯では大気透過度が優れた高地での観測や気球や飛翔体を用いた観測が必要であり、観測頻度やサイトが限られている点である。実際THz帯ヘテロダイン観測は、世界的に見てもまだ実演・散発観測の域を出ない。今後も観測時間の限られるTHz帯ヘテロダイン分光を強力に推し進めるためにはTHz検出器のマルチビーム化による高効率観測が重要な鍵を握る。しかし、現存の実用的な逡倍型固体発振器は、THz帯局部発振波としてマルチビーム受信機の複数素子を同時に励起するには出力がまだ充分では無い。

## 2. 研究の目的

この問題を打開する鍵は、量子カスケードレーザー(QCL)のヘテロダイン局部発振器への応用である。QCLは赤外領域では確立したレーザーである。しかし、10 THz以下での連続発振(CW)は難しく、またヘテロダイン分光観測に耐える周波数安定化の手法はまだ確立されていない。最近になって、サブバンドや

ミニバンドを利用したQCLで1THz近傍までのサブミリワット(数百 $\mu$ W)クラスのCW発振が報告されている。我々も3THz帯で発振するQCLの開発にも成功しており、今後、さらにこのQCLの大出力化・低周波化を推進する計画である。一方、もう一つ重要な課題は、QCLの周波数を高精度に固定する手法の開拓である。現状ではQCLのTHz波を直接分光して発振周波数を固定するようなフィードバックシステムが確立していない。本研究では、QCLを用いたTHz帯でのマルチビーム受信化/ヘテロダイン分光応用を見据え、我々の準光学型超伝導HEBミキサを応用した周波数安定化(PLL)システムの開発に着手する。

## 3. 研究の方法

QCLは通信やイメージングなどの分野で赤外線光源として広く普及し、常温での高出力化に重点がおかれている。このためヘテロダイン分光のLOに要求されるような連続発振性能と周波数安定性能( $f/f \sim 10^{-7}$ )を追求する開発は限られたものとなっている。QCLではTHz発振波がキャビティの劈開面から直接放射される。しかし、その放射光の周波数ドリフト等をリアルタイムに分光し、注入電流にフィードバックする手法が存在しないため、QCLの周波数安定化(PLL)が困難とされてきた。本申請の最大の斬新性・特徴は、1)強度の微弱な逡倍型発振器の参照信号と、QCLなどの周波数フリーランのTHz波を一部分岐したものを、我々のHEBミキサに直接照射してビート信号をとりだし、2)このビート信号の位相比較を行い、THz発振器の印加電圧・電流を高速制御することで、THz発振波の周波数を安定化させる(位相ロックをかける)、という点である。この手法は最近ではSRON/MIT/Delft工科大/マックスプランク研究所の合同チームなどでも開発が進んでおり、我国でも着手が急務である。

本研究期間において、分子線エピタキシー成膜システムの蒸着レートの再現性がとれ

ない症状が発生し、現在 2 THz 帯での CW-QCL の製作を調整中である。そこで本研究では、QCL の代わりにフリーランの 100 GHz 帯ガン発振器の信号を 18 逡倍して 2THz 帯で発振させるシステムを構築して、THz 波の位相同期固定を開発・動作検証する。

#### 4. 研究成果

(1)HEB ミクサを用いた PLL システムの開発  
超伝導 NbTiN 細線を集積した準光学型 HEB ミクサを応用した図 1 のような位相固定(PLL)システムを開発し、その動作検証に成功した。

まず、真空チャンバー内でパルス管冷凍機を用いて 4K に冷却している HEB ミクサに、周波数発生器(SG:Agilent E8257D)からの 12-14 GHz 帯の信号を  $x9x2x2x2x2$  の逡倍型個体発振器(VDI 社)で増幅し、1.8-2THz 帯の基準信号を照射する。この SG には、ルビジウム発振器を原振とした GPS 同期型の 10MHz 基準信号発生器(Model 3272D)を用いて、周波数を  $\pm 10^{-10}$  以内に高精度に制御しており、これがリファレンス信号の役割を果たす。加えて、QCL を想定し、100GHz 帯ガン発振器(Nitsuki)の信号を  $x9x2$  の逡倍器(VDI 社)を用いて同波長域の THz 信号を生成し、HEB ミクサに照射する。ガン発振器の周波数は供給電圧で制御しない場合はフリーランとなる。HEB ミクサから出力されるこれら 2 つのビート信号(1st IF)は、冷却アイソレータ、冷却 HEMT アンプ、常温アンプを経由してチャンバー外でさらに増幅される。この 1st IF 信号が例えば 1.44 GHz の場合、これにさらに別の周波数発生器(SG2)からの 1.34 GHz 信号を常温ミクサで混合し、100 MHz のビート信号を取り出す。これと、さらに別の周波数発生器(SG3)からの 100 MHz 信号を XL Microwave 800A の位相比較器に取り込み、位相差に相当する電圧変位をガン発振器の供給電圧に帰還させる。これら SG2, SG3 についても、上記 GPS 同期型基準信号発生器を用いて高精度に周波数安定化している。

動作検証の結果、少なくとも 200 Hz の resolution bandwidth (RBW)で 200Hz のスペクトル幅(3dB-linewidth)(図 2)、20 Hz の RBW で 20Hz のスペクトル幅が安定して得られた。これにより、我々の HEB ミクサの高速ヘテロダイン駆動の特徴を生かした、フリーランの THz 電磁波を直接位相固定する手法を確立した。この PLL システムを用いた今回の実験では、フリーランの THz 発振器として、ガン発振器を原振とした逡倍型固体発振器を利用したが、PLL システムの電圧制御出力の最終段にはパワーアンプを用いて電流/電圧の増幅やオフセットの調整を行える仕組みにしてあるため、そのまま CW-QCL の DC 電圧制御にも実装が可能となっている。

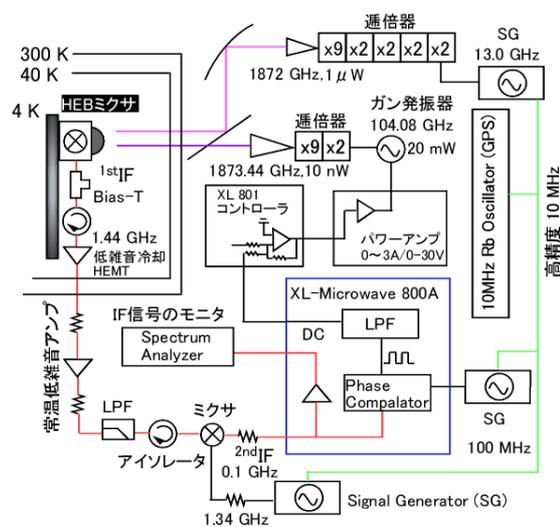


図 1.開発した THz 発振波の PLL システム。

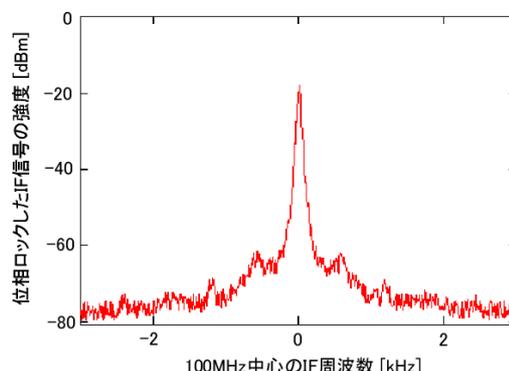


図 2. 本 PLL システムを用いて位相固定した THz 発振波。THz 波を 100 MHz 中心の 2nd-IF 信号へとダウンコンバートし、スペクトラムアナライザーでスペクトル波形をモニターした。

## (2)HEB ミクサのモデル

マルチビーム受信機では多くの検出素子を再現性よく製作する必要がある。HEB ミクサの基本的動作メカニズムはよく理解されており、標準的なプロセスで素子を製作する範囲において大局的な特性は一致する。しかし、より詳しく比較するとその特性(IV 特性、出力特性など)にはばらつきがある。これは細線の微細構造やその形成プロセスにおける僅かな違い・誤差が、様々な物性変化(近接効果の程度の違いなど)を誘発しているため、と考えられる。HEB ミクサ素子の細線形成は電子ビーム描画装置を用いて行うため、光露光の転写を用いた手法のように量産が難しいのが実情である。このため、HEB ミクサ素子の特性の再現性の違いについて系統的・統計的に原因を探ることは容易では無い。そこで、製作した DC-IV 特性の僅かな違いから、素子のパフォーマンス(感度、帯域、動作安定性など)や、製作工程で発生したプロセスのずれなどを予測・再現するシミュレーション・モデルを開発した。

特に HEB ミクサ素子のヒステリシス構造や超伝導電流領域 遷移領域 常伝導領域の非線形特性は、素子の細線構造についての重要な情報を保持している。このモデルでは、細線の多層領域における近接効果などの影響を受ける抵抗-転移温度特性なども取り込んでおり、従来のモデルと比べてより非線形・不連続な構造を再現できるようになっている(図3)。

本シミュレーション・モデルは、今後の HEB ミクサ素子の製作プロセスの再現性の理解や素子構造設計の指針に重要な役割を果たし、本研究が目指す THz 受信機のマルチビーム化の促進に重要な役割を果たすと期待される。

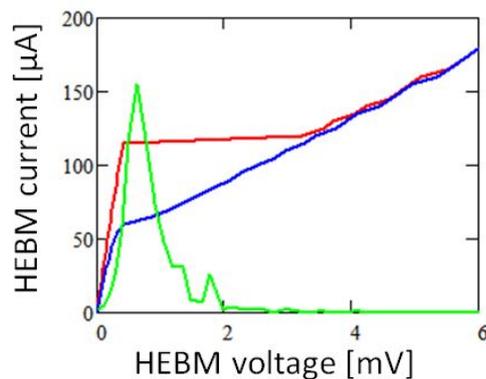


図 3. HEB ミクサ素子の IV 特性(赤、青)と IF 出力(緑)のモデル計算例。青は LO 照射有りの IV 特性。赤は LO 照射無しの IV 特性。超伝導細線のヒステリシス構造も良く再現している。

## 5. 主な発表論文等

[学会発表](計 4 件)

- 1)「惑星大気のミリ・テラヘルツ帯ヘテロダイン分光ための超伝導検出素子の開発」、前澤裕之(大阪府立大)、日本地球惑星科学連合 PPS03-P03、2012、(幕張メッセ) 5/20-25
- 2)「Development of Superconducting Detectors for MM/THZ Band Heterodyne Spectroscopy of Earth's and Planetary Middle Atmosphere」、Hiroiyuki Maezawa (Osaka Prefecture Univ.), AOGS-AGU (WPGM) Joint Assembly, Resorts World Convention Centre, Singapore, 13-17 August, 2012
- 3)「超伝導ホットエレクトロニクスボロメータミクサ素子のモデルの開発」、切通僚介、堀内滉介、前澤裕之(大阪府立大学)、日本天文学会 2013 年秋季年会(東北大学) 9/10-12
- 4)「Development of Superconducting Hot Electron Bolometer Mixer Detectors for Terahertz Band Astronomy and Planetary Atmospheric Research」、H. Maezawa, Horiuchi, R. Kiridoshi, (Osaka Prefecture Univ.), T. Shiino, T. Soma, R. Furuya, Y. Watanabe, T. Sakai, Y. Nishimura, N. Sakai, K. O. Ohguchi, L. Jiang, S. Yamamoto (Univ. of Tokyo), 2013 Asia-Pacific Radio Science Conference, Howard International House, Taipei, Taiwan, Sept. 3-7, 2013

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

前澤裕之 (MAEZAWA Hiroiyuki)  
大阪府立大学大学院理学系研究科・准教授  
研究者番号: 00377780

### ・協力研究者

入交芳久、関根徳彦、竇迫巖 (情報通信研究機構)、山本智、大口脩 (東京大学)、切通遼介 (大阪府立大学)