

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26287033

研究課題名(和文) 1.9THz帯天文ヘテロダイン分光観測の為に導波管型超伝導HEBミキサ素子の開発

研究課題名(英文) Development of 1.9THz-band waveguide-type hot-electron bolometer mixer for astronomical heterodyne spectroscopy

研究代表者

前澤 裕之 (Maewaza, Hiroyuki)

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) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：テラヘルツ(THz)帯は電波と赤外の狭間にあり、高感度なヘテロダイン検出器が未開拓の波長領域となっている。銀河の物質循環を担う炭素イオンや酸素原子、その他多くの分子の高励起線、地球・惑星の酸化反応を司るOHラジカルなどのスペクトル線も1.8-2THz帯に分布する。これらガス種の周波数高分解能のリモートセンシングの突破口を開くべく、超伝導NbTiN細線を集積したホーン/導波路型ホットエレクトロンプロメータ(HEB)ミキサ素子を1.8-2THz帯まで設計を高周波化し、その微細加工技術を確立した。また、本HEBミキサを用いた地球・惑星大気の大気衛星リモートセンシング観測のフィジビリティを検証した。

研究成果の概要(英文)：The terahertz(THz)-wave band lies between radio waves and the infrared bands, which is an unexplored wavelength region for highly sensitive heterodyne detectors. Spectral lines of carbon ions and oxygen atoms, and so on, responsible for the material circulation in galaxies, high excitation lines of various molecules, and important oxidants like OH radical in the Earth's and planetary atmospheres are located in the 1.8-2 THz band. For opening up a breakthrough in highly-resolved remote sensing of these gaseous species, an 1.8-2 THz band horn / waveguide type hot electron bolometer (HEB) mixer employing a superconducting NbTiN thin bridge was designed and the microfabrication technology was established. In addition, we verified the feasibility of predicted THz band limb sounding observations of Earth's, martian and venusian atmospheres with the HEB mixers on-board SMILES-2.

研究分野：天文学、地球・惑星科学

キーワード：天文学 地球・惑星科学 超伝導デバイス テラヘルツ波 ヘテロダイン分光 放射輸送モデル リモートセンシング

1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ(THz)帯は電波と赤外の波長の狭間にあり、高感度検出器の開発が立ち遅れ、未開拓の波長領域となっている。星間ガスの冷却に重要な炭素イオン(CII)、酸素原子(OI)や分子の高励起線、地球や惑星大気酸化反応を司る OH ラジカルなどの重要なスペクトル線が 1.8-2 THz 帯に分布している。これらの微弱な分子・原子・イオンの周波数高分解能の検出器の突破口を開くべく、ヘテロダイン分光検出素子の実用化が期待されていた。

2. 研究の目的

超伝導 NbTiN 細線を集積したホーン/導波路型のホットエレクトロンボロメータ(HEB)ミキサ素子を 1.8-2THz 帯まで高周波化し、設計・微細加工技術を確立する。また、地球・惑星大気の衛星によるリムサウンディング観測の THz 帯のフィジビリティを検証する。

3. 研究の方法

申請者らは、1.8-2 THz 帯の超伝導 NbTiN 薄膜の細線を 2 次元アンテナに集積した準光学型 HEB ミキサ素子の開発を推進してきた。この準光学型の場合、素子結晶基板や導波路、ホーンアンテナなどの微細加工を必要としないため初期の基礎開発として有効である。その反面、アンテナのビームパターンの非対称性やサイドローブの大きさなどが天文観測や地球・惑星観測を実施する上で課題となっていた。一方で、我々は 1.5THz 帯までビーム特性の優れたホーン/導波路型の高感度 HEB ミキサ素子の開発も行ってきた。これらのノウハウの蓄積により微細加工の技術も向上してきたため、本研究ではホーン/導波路型の 1.8-2THz 帯 NbTiN 超伝導 HEB ミキサ素子に着手する。また、地球・惑星大気の衛星によるリムサウンディング観測については、Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder 2(SMILES2)ワーキンググループで検討が進む衛星に搭載することを想定し、特に地球・惑星大気の温暖化や酸化反応ネットワークに関わる微量分子の放射輸送モデルによるシミュレーションを実施し、当該

HEB 検出素子を搭載した場合のフィジビリティを検証する。

4. 研究成果

(1)1.9THz HEB 素子を有限要素法による高周波電磁界のシミュレーション(HFSS)により設計した。チップ/導波路は耐久性や加工の精度を確保できるように、単純なスケーリングではなく、サイズを可能な限り大きくできるように設計し、素子の基板サイズは厚み 18.4 μm 、幅 36.8 μm とした。挿入損は 0.1 dB 以下、導波路への反射は 1.9THz で -20 dB に抑えることができ、実用的な仕様を実現できた。

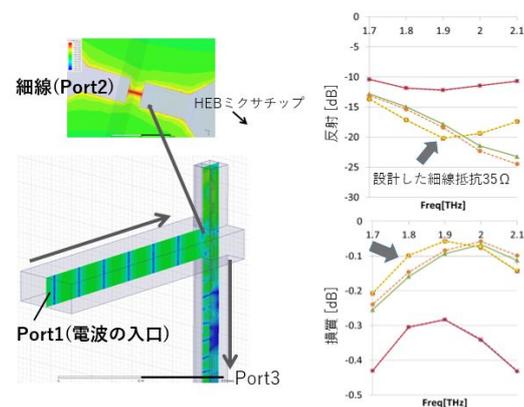


図 1: 左はチップ/細線と導波路の位置の関係。右は、HFSS による素子の反射・挿入損失。

また、ホーンは、まだこの波長域のコルゲートホーンの製作が難しいため、ダイアゴナルホーンとした。ビームの対称性を確保し、サイドローブを抑えるため、サブミリ波帯からの単純なスケーリングではなく、解析モデルと HFSS を用いてホーン内のモード変換部の距離を長めにとるなどの最適化を行った。これによりサイドローブを 15 dB 以下に抑えけるとともに、E/H 面の対称性を確保することができた。

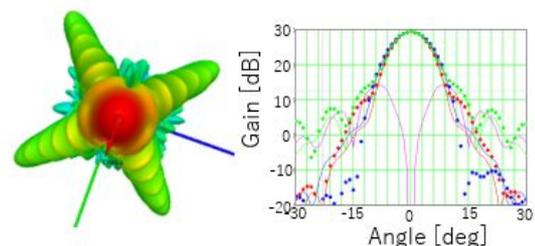


図 2: 左は HFSS によるビームパターン。右は E,H 面のゲインの角度依存性(交差偏波レベルは 15 dB 以下に抑えられている)。

(2)設計したチップを作成し、微細加工(ダイシング、研磨)を実施した。特にブレードのポストプロセスや、ダイシングのプレートや接着剤の素材を最適化することで、ほぼ 100%の加工の歩留まりを実現した。また、ミクサマウントの組み上げでは、チップを実装する底面に段差が発生するなどの課題も生じたが、レーザー顕微鏡(国立天文台 ATC センター)を用いて観察しながら位置合わせや追加工をしてアセンブリーする手法を確立した。

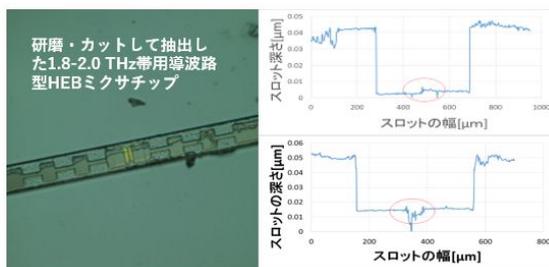


図3: 左は微細加工後抽出した1.9THz帯HEB素子。右上は、ミクサマウントをくみ上げた際に素子チップを置く導波路底面に段差が生じてしまっている様子(レーザー顕微鏡の計測による)。3μmの段差でも素子を実装して押し付けると素子が折れてしまう。右下図は段差がフラットな面となるように、その場でレーザー顕微鏡を見ながら加工修正した後の計測結果。(削りこみが深くなっている部分は修正時に形成されたものであるが、素子の実装や性能には影響は無い)。

(3)実際に NbTiN-HEB 素子を、ミクサマウントに実装し、専用に構築した冷却光学系に取り付けて、パルス間機械式冷凍機を用いて4Kの冷却試験を行った。素子のIV特性は、設計通りの超伝導電流特性と、常伝導領域の抵抗値35を得ており、正しく動作することを確認できた。

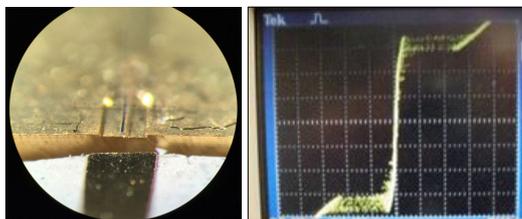


図4:左は実際に製作した1.9THzHEB素子をミクサマウントの導波路に実装した様子。この後、手前に見える中間周波信号用のマイクロストリップ線路にワイヤーボンディングして、素子を結線する。右は、パルス管冷凍機により4Kに冷却して得られた超伝導IV特性。

(4)SMILES2では専用の周回衛星により、地球温暖化やオゾン層の破壊・回復に関わる大気

微量成分の詳細把握を行い、同時に成層圏・中間圏の風速場・温度場を総合観測することで、大気環境の変動・将来予測につなげたいと考えている。特に4Kの機械式冷凍機を搭載すること視野にあり、本研究で開発した1.8-2THz帯HEBミクサ検出器を搭載する可能性を検討した。地球大気ではOHラジカルや酸素原子の1.8-2THz帯のリモートセンシングが期待されている。これらの分子・原子は、火星の大気の酸化反応ネットワークを解明する上でも大変重要である。そこで火星大気の放射輸送シミュレーションを行い、当該1.8-2THz帯NbTiN-HEBミクサを用いれば、これらの微量成分を短時間の現実的な積分時間で高いS/Nを得る観測が可能であることを示した。

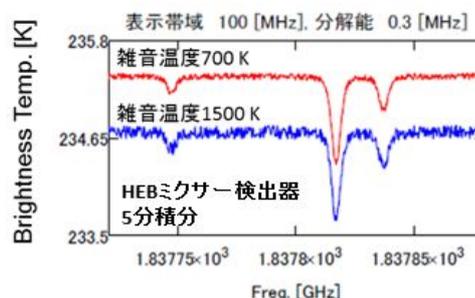


図5:NbTiN-HEB検出器を用いて火星大気の観測をした場合の放射輸送シミュレーションの例。OHラジカルなどを十分なS/Nで観測することができる。

これらの結果は2017年の地球電磁気・地球惑星圏学会(SGEPSS)第142回講演会において「SMILES-2衛星計画における惑星大気・天文観測応用」というタイトルで発表を行い、学生発表賞(オーロラメダル)を受賞した。

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3件)

Ochiai, S., Baron, P., Nishibori, T., Irimajiri, Y., Uzawa, Y., Mnabe, T., Maewawa, H., Mizuno A., Nagahama, T., Sagawa H., Suzuki M., and Shiotani, M., "SMILES-2 mission for temperature, wind, and composition in the whole atmosphere", Scientific Online Letters on the Atmosphere/Meteorological Society

of Japan, SOLA, 2017, Vol. 13A,13-18
Maezawa, H., (Invited Paper),
“Application of Superconducting
Hot-Electron Bolometer Mixers for
Terahertz-Band Astronomy”, IEICE
Transactions on Electronics, Vol. 98,
Issue 3, pp. 196-206,(2015)
Shiino, T.; Furuya, R.; Soma, T.;
Watanabe, Y.; Sakai, T.; Jiang, L.;
Maezawa, H.; Yamakura, T.; Sakai, N.;
Yamamoto, S. “Low-noise 1.5 THz
waveguide-type hot-electron bolometer
mixers using relatively thick NbTiN
superconducting film”, Japanese Journal
of Applied Physics, Volume 54, Issue 3,
article id. 033101 (2015)

〔学会発表〕(計 20 件)

「超伝導検出素子を用いた宇宙・地球惑星
科学の展開」(招待講演) 前澤裕之、低温工
学・超電導学会関西支部第 4 回講演会、2018
年

「THz 帯超伝導ヘテロダイン分光器の開発
による SMILES-2 衛星の天文観測応用」、西田
侑治、松本怜、前澤裕之、塩谷雅人、西堀
俊幸、鈴木睦、佐川 英夫、落合啓、野口卓
宮地晃平、山本智、大口 脩、海老澤勇治、
他 SMILES-2 ワーキンググループ、日本天文
学会春季年会 2018 年

「SMILES-2 ミッション、成層圏・中間圏・
下部熱圏の衛星による観測計画」、落合 啓、
パロン フィリップ、入交 芳久、鶴澤 佳徳、
西堀 俊幸、鈴木 睦、真鍋 武嗣、前澤 裕之、
水野 亮、長浜 智生、塩谷 雅人、JpGU-AGU
Joint Meeting (国際学会)、2017 年

「テラヘルツ超伝導ヘテロダイン検出素子
を用いた SMILES2 の天文観測応用」(招待講
演) 前澤裕之、SMILES-2 サイエンスワー
クショップ(神戸大 惑星科学研究センター
/CPS)、2017 年

「SMILES-2 を用いた火星/金星大気の THz
帯リモートセンシングを見据えた放射輸送
シミュレーション」、西田侑治、前澤裕之、
真鍋武嗣、塩谷雅人、西堀俊幸、鈴木睦、佐
川英夫、水野亮、長濱智生、落合啓、Baron
Philippe、入交芳久、鶴澤佳徳、日本惑星科
学会秋季講演会、2017 年

「SMILES-2 衛星計画における惑星大気・天
文観測応用」、西田侑治、前澤裕之、真鍋武嗣、
塩谷雅人、西堀俊幸、鈴木睦、佐川英夫、水野
亮、長濱智生、落合啓、Baron Philippe、入交
芳久、鶴澤佳徳、第 142 回 地球電磁気・地球
惑星圏学会 総会・講演会(秋学会)、2017
年

「THz 帯超伝導ヘテロダイン検出器の搭載
による SMILES-2 衛星の天文観測応用」、西田
侑治、松本怜、前澤裕之、真鍋武嗣、塩谷

雅人、西堀俊幸、鈴木睦、佐川英夫、水野亮、
長濱智生、落合啓、Baron Philippe、入交芳
久、鶴澤佳徳、日本天文学会秋季年会 2017
年

「Spaceborne superconducting sounder
(SMILES-2) for the upper-atmosphere
observation」 S. Ochiai, P. Baron, Y.
Uzawa, Y. Irimajiri, T. Nishibori, M.
Suzuki, T. Manabe, H. Maezawa, A. Mizuno,
T. Nagahama, and M. Shiotani, 28th
International Symposium on Space
Terahertz Technology, March 13-15, 2017,
Cologne, Germany

「SMILES-2 による中層大気統合観測計画
と検討状況」、塩谷雅人、落合啓、Philippe
Baron、入交芳久、鶴澤佳徳、鈴木睦、西堀俊
幸、真子直弘、前澤裕之、真鍋武嗣、水野亮、長
濱智生、第 30 回大気圏シンポジウム(JAXA)
12/5-6, 2016

「超伝導 NbTiN 細線を集積した 1.9THz 帯
ホーン/導波管型超伝導 HEB ミクサ検出素子
の開発」前澤 裕之、齊藤 滉介、西田 侑治、
相馬 達也、大口 脩、山本 智、Japan
Geoscience Union Meeting, May, 24-28, 2016

「SMILES-2 を用いた火星大気の 1.9 THz 帯
リモートセンシングを見据えた放射輸送シ
ミュレーション」西田 侑治、齊藤 滉介、森
前 和宣、原口 大輝、前澤 裕之、佐川 英夫、
鈴木 睦、塩谷 雅人、Japan Geoscience Union
Meeting, May, 24-28, 2016

「SMILES-2 衛星を想定した太陽系地球型惑
星のサブミリ/THz 帯放射輸送 シミュレーシ
ョン」西田侑治、齊藤滉介、森前和宣、前
澤裕之、佐川英夫、鈴木睦、塩谷雅人、日本
天文学会 2016 年秋季年会(愛媛大) 9/14-16

「1.9 THz 帯ホーン/導波路型 NbTiN-HEB ミ
クサ検出素子の開発」齊藤滉介、西田侑治、
前澤裕之、相馬達也、海老澤勇治、大口脩、
山本智、日本天文学会 2016 年秋季年会(愛
媛大) 9/14-16

「SMILES-2 の 1.9 THz 帯ヘテロダインリ
モートセンシングによる太陽系地球型惑星
の大気放射輸送モデル」、西田侑治、齊藤滉
介、原口大輝、森前和宣、前澤裕之、佐川
英夫、鈴木 睦 (ISAS/JAXA)、塩谷雅人、日
本天文学会 2016 春季年会(首都大学東京)

「SMILES-2 衛星観測のための太陽系地球型
惑星の大気放射輸送シミュレーション」西
田侑治、齊藤滉介、森前和宣、前澤裕之、佐
川英夫、鈴木睦、塩谷雅人、第 16 回ミリ波
サブミリ波受信機ワークショップ(電気通信
大学) 2016/3/7-8

「超伝導 NbTiN を集積した 1.9THz 帯導波
管型ホットエレクトロンボロメータ・ミクサ
検出素子の開発」齊藤滉介、西田侑治、前澤
裕之、相馬達也、山本智、第 16 回ミリ波サ
ブミリ波受信機ワークショップ、(電気通信
大学) 2016/3/7-8

「1.9 THz 帯導波管型超伝導 HEB ミクサ
検出素子のホーン/光学設計」齊藤滉介、井

上将徳、長谷川豊、木村公洋、前澤裕之、
相馬達也、山本智、日本天文
学会 2015 秋季年会 (甲南大学)

「超伝導 NbTiN を集積した 1.9THz 帯導波
管型ホットエレクトロノボロメータ・ミクサ
検出素子の開発」齋藤 滉介、井上 将徳、長
谷川 豊、木村 公洋、前澤 裕之、相馬 達也、
大口 脩、山本 智、Japan Geoscience Union
Meeting,(幕張メッセ)、2015/5/24-28

「太陽系地球型惑星大気の 1.9 THz 帯放射
輸送シミュレーション-SMILES-2 衛星の利用
を見据えて-」西田侑治、齋藤滉介、森前和
宣、前澤裕之、佐川英夫、鈴木睦、塩谷雅人、
第 29 回大気圏シンポジウム、宇宙航空研究
開発機構 宇宙科学研究所 新 A 棟 2 階 A 会
議室、2015/3/7-8

「1.9THz 帯導波管型超伝導 NbTiN-HEB ミク
サ検出素子の開発」
齋藤滉介、井上将徳、長谷川豊、木村公洋、
小川英夫、前澤裕之、相馬達也、海老澤勇
治、大口脩、山本智、日本天文学会 2015 春
季年会 (大阪大学)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ

<http://www.astro.s.osakafu-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者

山本 智 (YAMAMOTO Satoshi)
東京大学大学院理学系研究科・教授
研究者番号：80182624

(4) 研究協力者

大口脩 (Oguchi Osamu) (東京大学)
相馬達也 (Soma Tatsuya) (東京大学)
海老澤勇治 (Ebisawa Yuji) (東京大学)
齋藤滉介 (Saito Kosuke) (大阪府立大学)
西田侑治 (Nishida Yuji) (大阪府立大学)
木村公洋 (Kimura Kimihiro) (大阪府立大学)