

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：34504

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H00702

研究課題名(和文) テラヘルツ天文学を切り開く高感度電波分光観測用受信機の開発

研究課題名(英文) Development of Highly Sensitive Radio Receiver for THz Astronomy

研究代表者

瀬田 益道 (Seta, Masumichi)

関西学院大学・理学部・教授

研究者番号：80358994

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,400,000円

研究成果の概要(和文)：天体からのテラヘルツ帯の信号を数GHzの周波数帯へと周波数変換する電子素子(SISミキサー)において、従来材料のNbに変えNb3Geを用いることでTHz帯受信機の高感度化を試みた。X線による構造解析からNb3Geの薄膜の積層は確認できたが、SIS素子としての電気的な特性には未だ課題が残った。SISを搭載する冷却受信機としては、1.8kWの低い消費電力ながら4Kを実現する冷却受信機を作製し、1.5THzまで出力可能なローカル信号源を整備した。南極新ドームふじ基地での30cm望遠鏡の運用が、国立極地研究所の南極観測第X期の観測課題として採択され、テラヘルツ天文学の観測サイトを得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

テラヘルツ帯は、電波天文学の最後の観測空白域である。星間物質の冷却過程で重要な電離炭素原子CIIの輝線(1.9THz)や電離窒素原子NIIの輝線(1.46THz)等、他の周波数領域では観測できない輝線があり天文学上重要な帯域である。長年観測を妨げていたのは、テラヘルツ帯の電波は大気での吸収が強いという観測サイトの問題、及びテラヘルツ帯では高感度受信機がないという技術的な要因である。本研究は、THz帯の受信機の高感度化に有用な、Nb3Geの薄膜生成技術の進展、南極大陸内陸部の地上で唯一の観測サイトである、南極新ドームふじ基地での天文台開設の目処がたった点に意義がある。

研究成果の概要(英文)：We succeeded in manufacturing Nb3Ge layer on Si substrate as a new device as a mixer for heterodyne detection in THz astronomy. However we need further improvement as a highly sensitive device. We developed a 4K class cry receiver that works only power consumption of 1.8 kW. Antarctic plateau is only site on earth for THz astronomy. Our plan of operations of 30cm telescope in new Dome Fuji Station is approved as a research project of National Institute of Polar Research, that open a way to operate our developed THz receiver in antarctica.

研究分野：天文学

キーワード：電波天文学

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ帯 (1~3 THz) は電波天文学の最後の観測空白域である。星間物質の冷却過程で重要な電離炭素原子 CII 輝線 (1.9 THz) や電離窒素原子 NII の輝線 (1.46 THz) 等、他の周波数領域では観測できない輝線があり天文学上重要な帯域である。長年観測を妨げていたのは、テラヘルツ帯の電波は大気での吸収が強いという観測サイトの問題、及びテラヘルツ帯では高感度受信機がないという技術的な要因である。天体からの観測信号は地球大気で減衰するが、テラヘルツ帯では主に水蒸気による吸収が激しい。そのため、ハワイのマウナケア山頂やチリ北部のアタカマ砂漠等の高地が観測サイトとして開拓されてきたが、満足できる観測条件は得られていない。南極大陸内陸部に広がる寒冷 (平均気温 -55°C) な高原地帯は、水蒸気が少なく地上で唯一のテラヘルツ帯の観測サイトである。しかしながら、これまで 3000 m を超える南極高地での天体観測は、サイト調査や試験的な観測に留まっている。電波を用いた天体観測では、天体の放射した電波の持つ位相情報を保持したまま波として検出できるので、光や赤外線と比べて高い周波数分解能での分光観測が行える。しかし、テラヘルツ帯の観測 (RF) 信号はそのままでは分光計で扱えないので、ミキサーを用いて、ローカル (LO) 信号を混ぜ数 GHz 帯の低い周波数の中間周波数 (IF) 信号へと周波数を変換するヘテロダイン受信を行う。受信機の観測感度は前段に置かれたミキサーで発生する雑音の大きさに決まる。超伝導体を用いたミキサーが低い雑音を達成することが知られているが、テラヘルツ帯では、高感度なミキサー素子が存在しない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、(1)超伝導素子 (SIS) の物性を理解してテラヘルツ帯のミキサー用の SIS 素子を製作すること、(2)テラヘルツ帯 SIS 素子を搭載したヘテロダイン受信機を製作すること、(3)テラヘルツ帯ヘテロダイン受信機を運用するサイトを開拓することである。

3. 研究の方法

第1の目的であるテラヘルツ帯の SIS 素子作成の研究課題は、半導体のギャップ周波数による周波数の上限の拡大、及び素子の電流密度の増加である。SIS ミキサーは、超伝導体 (S) と絶縁体 (I) の薄膜をサンドイッチ状に積層した素子であり、その電流-電圧の非線形性を利用して周波数を変換する。ギャップに相当する周波数より高い周波数が入射した場合により生じる電流は、電子対が破壊されて超伝導特性が失われているため雑音が増加してしまう。従来用いられてきた Nb のギャップ周波数は約 0.7 THz である。我々はギャップ周波数が 1.2 THz の Nb₃Ge を超伝導体として用いることを目指した。実現すれば 2.4 THz までのヘテロダイン受信機による分光観測が可能となる。SIS ミキサーは基板上への材料物質の積層とエッチングによりマイクロストリップライン上に SIS 構造を形成する。SIS は構造上電気容量 C を持つことが避けられないが、高い周波数に対して回路を短絡する効果があり信号の変換効率が低下してしまう。SIS 積層加工時に電子的な集積回路を設け、C を同調して打ち消す必要がある。同調回路を初めとする電気的な特性は計算機シミュレーションで評価しておく。THz 帯での運用には、SIS を流れる電流密度の増加が必要である。電流密度を高めるには、原子レベルでの結晶構造の制御が必要である。まずは、原子レベルで制御した薄膜の形成が第1ステップとなる。

研究の第2の目的は、天文学の道具としての SIS 受信機の開発である。地上において、テラヘルツ帯の観測が恒常に行える場所は、低温 (平均気温 -55°C) な高地 (標高 3000 m 以上) の南極大陸内陸部の高原地帯に限定される。南極での 4 K 級冷凍機の運用は難しい。低温低気圧という厳しい環境的な要因に加え、発電用の燃料の輸送の困難さから、電力が非常に厳しい点が制約となる。SIS の動作には、超伝導状態を得るために、4 K 級の極低温に SIS 素子を冷却する必要がある。通常、機械式冷凍機を用いた冷却では、6 kW 程の消費電力が必要であるが、我々は、定消費電力 (1.8 kW) の冷凍機の開発経験を生かして、低消費電力の 4 K 冷却受信機を開発する。

第3の目的である観測サイトとしては、我々は、長年、南極大陸内陸部に着目し、サイト調査をはじめ、サブミリ波からテラヘルツ帯の天文台開発を目指してきた。南極は環境が過酷であり、アクセス方法や滞在手段も限定される。南極内陸部へのアクセスは、夏期の限られた期間に、実績のある機関による計画に組み込まれない限り不可能である。国立極地研究所等と協力しながら、南極大陸内陸部の新ドームふじ基地に、テラヘルツ帯天文学の観測サイトの開設をする。

4. 研究成果

テラヘルツ帯の超伝導体と素子の材料として有望な Nb₃Ge の良好な薄膜をサファイヤ基板の上に形成することに成功した。しかし、電気的特性の計算機解析の結果、基板の厚みを 1 μm 以下としないと、1 THz のミキサーとして十分な性能が得られないことが判明した。サファイヤ基板を薄く加工するのは困難なことも判明した。基板を Si に変更すれば 1 μm 以下に薄くすることが可能なので、Si 基板上での Nb₃Ge 薄膜の形成を試みた。Si 基板への直接の積層を行い、電流電圧特性を評価したところ、超伝導転移が見られなかった。結晶構造が問題と考えられたので、

Si 基板と Nb₃Ge 薄膜の間にバッファ層を設け、その材質として SiC と Al₂O₃ を試した。Al₂O₃ を用いた場合に、転移温度 19 K の超伝導状態を得ることができた。また、X 線回折による結晶構造を解析したところ、Nb₃Ge の良好な結晶が、サファイア基板の場合と同様に形成されていることを確認した。しかしながら、転移温度を初めとした電気的な特性は、サファイア基板上で得られた特性には達していない。電子顕微鏡を用いた表面の観察と、X 線による構造解析から、Al₂O₃ のバッファ層がアモルファス状態であり、平坦度が悪いことが原因である可能性が高まった。所望の特性の SIS 作製には、さらなる薄膜積層の技術の進展が必要なことが判明した。

超伝導素子を搭載したヘテロダイン受信機は 4 K に冷却する必要がある。信号導入窓に複数の赤外線フィルターの配置、熱伝導による熱流入を熱アンカーで制御し、1.8 kW の消費電力で 3.8 K の環境を実現した。さらに、冷凍機のコールドヘッド部は同一構造として SIS 等の冷却受信機に搭載する電子部品の変更はなしに、コールドヘッドのモータ及び圧縮機を交換することで、消費電力は 3 kW 程度に増加するが、4 K ステージの冷却能力を 0.1 W から 0.2 W へと増強できる構成も選択できる設計とした。THz 帯でローカル信号源の構築が困難であるが、バージニアダイオード社製の逡倍器及び増幅器を導入して、1.5 THz 帯の SIS で想定される動作に必要な 20 μW のテラヘルツ信号を発生するシステムを構築した。

観測サイトの開拓に関して、国立極地研究所の第 X 期 6 ヶ年計画の研究課題の一つとして、内陸部の新ドームふじ基地での 30 cm サブミリ波望遠鏡の運用が決定した。当面は南極の夏の間観測を行う。南極天文台のプロトタイプとして可搬型の 30 cm 望遠鏡を開発し、耐寒性能や消費電力が少ないこと等は実証してきたが、最低気温が -80 に達する冬季の保管方法に懸念が示されていた。断熱材、蓄電池及びヒータで 30cm 望遠鏡を覆えば冬季の保温が問題ないことを示した。ただし、実際に長期に渡る低温評価試験は行えないため、万が一に備え、最重要部品は容易に外せる構造として、冬の間は、昭和基地に下ろして保管する策を示し、計画が認められた。30cm 望遠鏡を運用する夏の期間は白夜のため、望遠鏡の指向制度確立のために、通常用いる光学望遠鏡を用いた星の位置の観測による補正が難しい。CCD カメラや望遠鏡レンズを最適化し、昼間でも星が観測できる装置を開発した。30cm 望遠鏡は当初は、星間物質の観測で有用な一酸化炭素 CO J=4-3 輝線および中性炭素原子 CI 輝線のサブミリ波帯 (0.5 THz) での同時観測を行うが、光学系は副鏡および受信機設置位置に関して、周波数に独立な設計となっており、今回開発したテラヘルツ帯の受信機を搭載可能としている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5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 Okon Hiromichi, Tanaka Takaaki, Uchida Hiroyuki, Tsuru Takeshi Go, Seta Masumichi, Kokusho Takuma, Smith Randall K.	4. 巻 921
2. 論文標題 Investigation of the Physical Origin of Overionized Recombining Plasma in the Supernova Remnant IC 443 with XMM-Newton	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 99 ~ 99
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac1e2c	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 Sato Keisuke, Miyamoto Yusuke, Kuno Nario, Salak Dragan, Wagner Alexander Y, Seta Masumichi, Nakai Naomasa	4. 巻 73
2. 論文標題 Relating gas dynamics to star formation in the central region of the barred spiral galaxy NGC 613	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1019 ~ 1035
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab060	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 Miyamoto Yusuke, Yasuda Atsushi, Watanabe Yoshimasa, Seta Masumichi, Kuno Nario, Salak Dragan, Ishii Shun, Nagai Makoto, Nakai Naomasa	4. 巻 73
2. 論文標題 Atomic carbon [C I](3P1-3P0) mapping of the nearby galaxy M 83	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 552 ~ 567
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab020	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 Salak, Dragan; Nakai, Naomasa; Seta, Masumichi; Miyamoto, Yusuke	4. 巻 887
2. 論文標題 ALMA Observations of Atomic Carbon [C I] (3 P 1 3 P 0) and Low-J CO Lines in the Starburst Galaxy NGC 1808	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 143-166
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab55dc	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18件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 茅野太一, 久野成夫, 本多俊介, 瀧口風太, 青木美和, 西堀俊幸, 瀬田益道, 南極天文コンソーシアムメンバー
2. 発表標題 南極 30 cm サブミリ波望遠鏡用光学ポインティングシステムの開発 II
3. 学会等名 日本天文学会2023年春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宮本祐介, 瀬田益道, 中井直正, Salak Dragan, 渡邊祥正, 石井峻, 長谷川哲夫, 幸田仁
2. 発表標題 ALMA望遠鏡による吸収線観測で探る分子雲内部の中性炭素と一酸化炭素の関係
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nario Kuno, Shunkue Honda, Takuya Hashimoto, Futa Takiguchi, Miwa Aoki, Taichi Kayano, Masaki Iwata, Hiro Saito, Masumichi Seta, Naomasa Nakai, Kazuo Sorai, Dragan Salak, Chuya Handa, Makoto Nagai, Hiroshi Matsuo, Tomofumi Umemoto, Takahumi Kojima, Daisuke Iono, Yoshinori Uzawa
2. 発表標題 Antarctic 30-cm Submm Telescope Project
3. 学会等名 RIKEN-NICT-East Asia Receiver Joint Workshop 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tai Kawachi, Masumichi Seta, Shuto Fujimori, Nario Kuno
2. 発表標題 Improvement in gain stability of 20GHz receiver
3. 学会等名 RIKEN-NICT-East Asia Receiver Joint Workshop 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Mina Matsuura, Shohei Ezaki, Takeshi Sakai, Takashi Noguchi, Masumichi Seta
2. 発表標題 Investigations of Nb ₃ Ge Thin Films on Si Substrates
3. 学会等名 RIKEN-NICT-East Asia Receiver Joint Workshop 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nario Kuno, Masumichi Seta, Kazuo Sorai, Naomasa Nakai, Makoto Nagai, Shunsuke Honda, Hiroshi Matsuo, Tomofumi Umemoto, Dragan Salak, Takuya Hashimoto
2. 発表標題 Antarctic 30-cm Submm Telescope Project
3. 学会等名 2022 URSI-Japan Radio Science Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 久野成夫、新田冬夢、橋本拓也、齋藤弘雄、Dragan SALAK、中井直正、瀬田益道、徂徠和夫、永井誠、梅本智文、松尾宏、他南極天文コンソーシアム
2. 発表標題 南極テラヘルツ望遠鏡計画
3. 学会等名 日本天文学会2021秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 梅本智文、久野成夫、齋藤弘雄、徂徠和夫、瀬田益道、中井直正
2. 発表標題 南極からの [N II] 1.46THz 輝線による銀河面サーベイ
3. 学会等名 日本天文学会2021秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮本祐介、保田敦司、渡邊祥正、瀬田益道、久野成夫、石井峻、永井誠、中井直正
2. 発表標題 近傍渦巻銀河 M83 の [Cl] mapping 観測
3. 学会等名 日本天文学会2021秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 久野成夫、新田冬夢、橋本拓也、齋藤弘雄、Dragan SALAK、瀧口風太、小山 徹、加藤良寛、瀬田益道、中井直正、徂徠和夫、八嶋裕、清水一揮、永井 誠、梅本智文、小嶋崇文、鶴澤佳徳、伊王野大介、長崎岳人、他南極天文コンソーシアムメンバー
2. 発表標題 南極 30cm サブミリ波望遠鏡計画
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 瀧口風太、久野成夫、新田冬夢、齋藤弘雄、瀬田益道、中井直正、小嶋崇文、鶴澤佳徳、伊王野大介、長崎岳人、他南極天文コンソーシアムメンバー
2. 発表標題 南極 30cm サブミリ波望遠鏡 受信機広帯域化
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小山 徹、齋藤弘雄、加藤良寛、久野成夫、Dragan SALAK、瀬田益道、永井誠、他南極天文コンソーシアムメンバー
2. 発表標題 南極 30cm サブミリ波望遠鏡用光学ポインティングシステムの開発
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Seta
2. 発表標題 2SB receivers for observation of atomic carbon lines
3. 学会等名 East Asian ALMA Development Workshop 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroki Yamashita ,Takeshi Sakai
2. 発表標題 Fabrication of Nb3Ge thin films
3. 学会等名 East Asian ALMA Development Workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野口 卓
2. 発表標題 THz帯SIS素子の開発の現状 - 1.5-2.0 THz帯SISミキサの開発に向けて
3. 学会等名 テラヘルツ波が拓く新しい宇宙像
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

関西学院大学理工学部物理学科瀬田研究室
<https://sci-tech.ksc.kwansei.ac.jp/~seta/>

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
研究 分担者	酒井 剛 (Takeshi Sakai) (20469604)	電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授 (12612)	
研究 分担者	中井 直正 (Naomasa Nakai) (80192665)	関西学院大学・理学部・教授 (34504)	

	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
研究 協力者	野口 卓 (Noguchi Takashi)		

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