

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：62616

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13469

研究課題名(和文) テラヘルツ光子計数技術を用いた天文観測手法の開拓

研究課題名(英文) Development of Terahertz Photon Counting Technology for Astronomical Observation

研究代表者

江澤 元 (Ezawa, Hajime)

国立天文台・チリ観測所・助教

研究者番号：60321585

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：テラヘルツ帯の光子計数技術とその天文観測への応用に関し、その実現のための要素技術を検討、開発した。量子型検出器であり高速動作が期待できる超伝導トンネル接合(SIS接合)を採用し、産業技術総合研究所の超伝導アナログ・デジタルデバイス開発施設(CRAVITY)を用いてリーク電流1 pAのSIS接合を開発した。これをアンテナと結合したSIS検出器を設計し、数値シミュレーションで確認するとともに、微弱な信号を読み出す回路の構成を検討した。またヘリウム4を用いた0.8 K吸着冷凍器を開発し、高い冷却能力を実証した。これら要素技術の開発研究により、光子計数型検出器の実現に技術的見通しを得られた。

研究成果の概要(英文)：Various key technologies to realize the terahertz photon counting detectors for astronomical observation are studied and developed. We decided to integrate a superconducting tunneling junction (SIS junction) into a photon counting detector. For this we developed a superconducting tunnel junction (SIS) with low leakage current at CRAVITY facility in AIST, and successfully realized a junction with leakage current as low as 1 pA. Based on this achievement we designed an SIS detector with a twin-slot antenna and a choke filter, and evaluated the performance by numerical simulations. The design of the readout circuit is also studied, which includes the first stage FET mounted next to the SIS detector. In order to cool these devices, we also developed a helium-4 sorption cooler, which has relatively high cooling power. These achievements will play important roll to realize the photon counting detectors for terahertz astronomy.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：電波天文学 テラヘルツ波天文観測 光子計数技術

1. 研究開始当初の背景

天文観測において、可視光から高エネルギーX線線にいたる波長域では、天体からの個別の光子を検出する観測手法が実用化されている。テラヘルツ帯 (300 GHz-10 THz) は 3-100 K の熱放射の観測に適しており、銀河や星形成など天体や宇宙の進化を研究する上で重要である。しかし、この領域ではヘテロダイン検出器やボロメータが一般的であり、光子検出技術は観測手法としては確立していない。量子光学の基礎的考察により、熱的放射源の光子はポアソン統計からずれており、光子到来間隔が非一様で、バンチングしていることが知られている。すなわち光子統計から光源の物理状態を探れる可能性がある。Hanbury-Brown et al. 1952 (Nature 170, 1061) による電波の強度干渉計実験は原理的には光子バンチを用いたものであったが、光子数の揺らぎから光源の物理状態を紐解くアプローチはされていない。

2. 研究の目的

テラヘルツ帯における光子数の揺らぎを統計的に評価することで光源の物理状態を解明できる可能性に着目し、テラヘルツ帯の天文観測手法に光子統計という概念を導入する。具体的には、量子光学の考え方を導入し、熱放射源からの光子数の揺らぎはポアソン統計よりも大きく、その程度は光源の輝度温度に依存するという原理を応用することで、光源の物理温度を決定する新たな試みである。そのために超伝導トンネル接合を用いてテラヘルツ帯における光子計数型の検出器を新たに開発、性能を評価し、デザインを最適化する。これにより、テラヘルツ帯の光子計数型検出器を実現する技術的見通しを得る。

3. 研究の方法

- (1) 将来の天文観測への応用を見据えて、テラヘルツ帯における光子検出型の検出器に対する技術要求を検討する。
- (2) 技術要求に基づき、必要な要素技術を開発する。本研究では宇宙空間での観測を目指す開発の前の第一段階として、まずは地上の実験室における検証実験を目的に据え、これに適した SIS 接合を開発する。その性能を評価する。
- (3) 得られた技術見通しに基づき、テラヘルツ光の検出器とその読み出し回路を設計する。これにより将来天体観測に応用できる見通しをつける。

4. 研究成果

- (1) テラヘルツ帯光子計数型検出器への技術要求
光子計数型検出技術とその天文観測への応用について、技術的要求を中心に検討した。1 Jy の典型的な天体を口径 10 m の望遠鏡で帯域 100 GHz で観測すると、観測される光子

は毎秒 1 億個に達すると期待される。これらの光子を個々に分解する光子計数を実現するには、検出器の動作帯域として 1 GHz 以上が必要となる。検出器の時間分解能と必要な雑音等価電力 (NEP) の関係を計算したものを図 1 に示す。テラヘルツ帯で 1 GHz の高速な光子計数が実現できれば、検出器に必要な雑音等価電力 (NEP) は 3×10^{-17} W/Hz 程度と見積もられる。

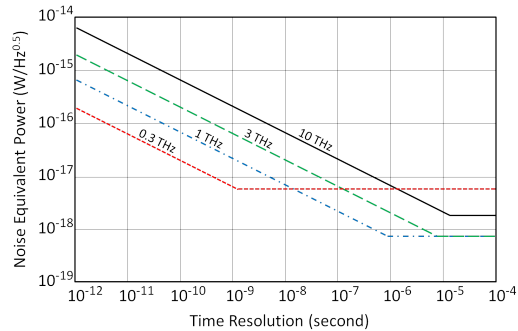


図 1: 宇宙空間からの観測における、検出器の時間分解能と必要となる NEP の関係 (比帯域 3 を仮定して計算)

(2) 検出器の開発

前節の見積もりに基づき、量子型検出器であり高速動作が期待できる超伝導トンネル接合 (SIS 接合) を採用することにした。SIS 接合の Photon assisted tunneling によりテラヘルツ光子を読み出す場合、検出器の NEP は接合のリーク電流のショット雑音により制限される。例えば、 $NEP=10^{-17}$ W/Hz を実現するには、リーク電流 1 pA が要求される (量子効率 =0.5 の場合)。

我々は産業技術総合研究所の超伝導アナログ・デジタルデバイス開発施設 (GRAVITY) を用いて、Nb/Al/AlOx/Al/Nb による低リーク電流の SIS 接合の開発を推進した。

本研究では、宇宙空間での観測を意図した広帯域検出器を開発する前に、まずは実験室における評価や検証実験を目的とした狭帯域の検出器を開発する。すなわち、臨界電流密度が低めであっても、リーク電流の低減を最優先に開発を推進した。

(3) 極低温下での検出器の性能評価

SIS 接合の開発と並行して、接合の評価環境も整備した。液体ヘリウムを用いた 4 K クライオスタット内にヘリウム 4-ヘリウム 3 吸着型冷凍器を実装し、0.4 K~1 K の極低温領域でリーク電流の温度依存性の測定系を構築した。前節で開発した SIS 接合をこの測定系で評価して接合の開発にフィードバックするというサイクルを実行し、最終的に接合面積 $9 \mu\text{m}^2$ 、極低温下でリーク電流 1 pA を達成できた (図 2)。臨界電流密度は 300 A/cm^2 であり、検出器の帯域は 4 GHz 程度となる。これは実験室における光子計数実験用には十分な帯域である。

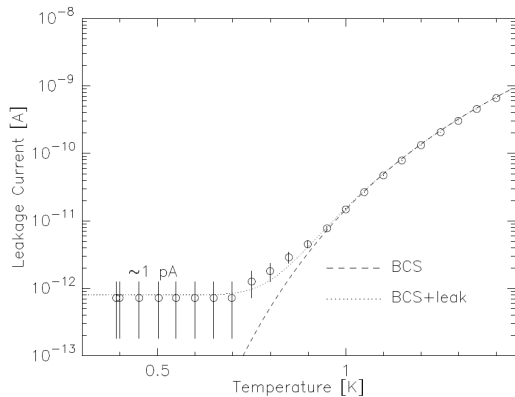


図2: 開発した SIS 接合の温度とリーク電流の関係。測定値とともに、測定系の系統誤差も表示した。点線は BCS 理論、実線は温度依存しないリーク電流を含むモデル曲線。

また、SIS の光学特性の評価によりテラヘルツ帯でも信号応答を確認でき、天体観測に求められる高い感度を実現できる見通しを得ることができた。

(4) アンテナ結合の検出器の設計

開発した接合面積 $9 \mu\text{m}^2$ の接合を用いて、アンテナと結合した SIS 検出器を設計した (図3)。実験室実験を意図し、周波数は 500 GHz に最適化した。アンテナにはサブミリ波やテラヘルツ帯の検出器で実績のあるツインスロットアンテナを採用し、コプレーナ導波路により信号を SIS 接合へ導く。SIS 接合は PCTJ 構造 (並列 2 接合構造) を採用し、コプレーナ導波路とのインピーダンス整合をとる。SIS 接合の出力は、チョークフィルターを介して読み出し回路へつなげる構造となっている。

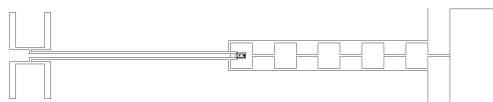


図3: アンテナ結合型 SIS 検出器の基本設計。左端がツインスロットアンテナ。PCTJ の SIS 接合は中央部に位置し、右端が読み出し回路へ接続するためのパッド。

このデザインに基づいて、電磁界シミュレータ HFSS を用いて数値シミュレーションを実行し、アンテナから SIS 接合へテラヘルツ帯の信号が正常に伝搬すること、チョークフィルターが設計通りに動作することなど、テラヘルツ光子計数実験に用いる検出器が設計できたことが確認できた。

(5) 読み出し回路の検討

SIS 検出器の読み出し回路の構成を検討した。SIS 検出器は 0.3-0.8 K の極低温に冷却して用いる。検出器が出力する信号は非常に微弱であるため、同一の極低温ステージ上に初段の FET を配置する。FET はゲート・リー

ク電流が低い必要があるため、例えば GaAs-JFET 等が候補となる。続いて信号を常温部に導くため、4 K の低温ステージ上に SiGe の広帯域アンプを配置する構成を検討した。

(6) 0.8 K 吸着型冷凍器の開発

検出器システムを構成する要素技術として、SIS検出器および初段の読み出し回路を極低温に冷却するための冷凍器を開発した。検出器の他、初段のFETも同時に冷却できる冷却能力を確保するため、ヘリウム4を用いた小型の吸着型冷凍器を製作し、冷却性能を実験的に評価した。その結果、到達温度0.8 K以下、保持時間約5時間の性能を達成した。これは従来のヘリウム3を用いた吸着型冷凍器よりも冷却能力が高く、高速動作が必要な光子計数型検出器の実現に必須の技術である。

(7) まとめ

これら主要な要素技術が開発できたことで、テラヘルツ帯の光子計数型検出器システムの実現に技術的な見通しを得ることができた。これらの成果は、光子統計を用いた新しい天文観測手法のみならず、強度干渉計の概念を用いた新たなテラヘルツ干渉計など、将来の新しい応用も期待できる。

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4件)

Matsuo, H., Ezawa, H., Kiuchi, H., Honma, M., Murata, Y., "Proposal of Photon Counting Terahertz Interferometry", JAXA Special Publication JAXA-SP-17-009E, 261-264, 2018. 査読無
URL:<https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/handle/a-is/874005>

Matsuo, H., Ezawa, H., Kiuchi, H., Honma, M., Murata, Y., Ukibe, M., Fujii, G., Shiki, S., Sakata, M., "Developments of Terahertz Intensity Interferometry using SIS Photon Counting Detectors", 11th Superconducting SFQ VLSI Workshop SSV 2018 - Program and Proceedings, 18-22, 2018. 査読無
URL:https://www.researchgate.net/publication/324169716_Developments_of_Terahertz_Inten

Ezawa, H., Matsuo, H., Ukibe, M., Fujii, G., Shiki, S., "SIS Detectors for Terahertz Photon Counting System", J. Low Temp. Phys. 184, 244-249, 2016. 査読有

Matsuo, H., Ezawa, H., “Advantages of Photon Counting Detectors for Terahertz Astronomy”, *J. Low Temp. Phys.* 184, 718-723, 2016. 査読有
DOI: 10.1007/s10909-015-1462-z

〔学会発表〕(計 30 件)

1. Ezawa, H., Matsuo, H., Ukibe, M., Fujii, G., Shiki, S., “SIS Photon Detectors for Terahertz Astronomy”, 29th IEEE international Symposium on Space Terahertz Technology, California Institute of Technology, Pasadena, California, U.S.A., 2018/3/26-28.
2. Matsuo, H., Ezawa, H., Kiuchi, H., Honma, M., Murata, Y., “Prospects of Terahertz Intensity Interferometry”, 29th IEEE international Symposium on Space Terahertz Technology, California Institute of Technology, Pasadena, California, U.S.A., 2018/3/26-28.
3. Matsuo, H., Ezawa, H., Kiuchi, H., Honma, M., Murata, Y., 「Terahertz Intensity Interferometry for 1 mas resolution」, 2017 年度宇宙電波懇談会シンポジウム、国立天文台三鷹(東京都三鷹市)、2018/3/19-20.
4. 松尾宏、江澤元、木内等、本間希樹、村田泰宏、浮辺雅弘、藤井剛、志岐成友、坂田美紗樹、「テラヘルツ強度干渉計の実現に向けて」, 日本天文学会 2018 年春季年会、千葉大学西千葉キャンパス(千葉県千葉市)、2018/3/14-17.
5. Matsuo, H., Ezawa, H., Kiuchi, H., Honma, M., Murata, Y., “Developments toward THz Intensity Interferometry”, 第 18 回ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ、国立天文台三鷹(東京都三鷹市)、2018/2/22-23.
6. Matsuo, H., Ezawa, H., Kiuchi, H., Honma, M., Murata, Y., Ukibe, M., Fujii, G., Shiki, S., Sakata, M., “Developments of Terahertz Intensity Interferometry using SIS Photon Counting Detectors”, 11th Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV 018), National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba, Japan, 2018/2/7-8.
7. Matsuo, H., Ezawa, H., Kiuchi, H., Honma, M., Murata, Y., “Studies on Imaging Performance of Terahertz Intensity Interferometry”, 第 18 回宇宙科学シンポジウム、宇宙科学研究所(神奈川県相模原市)、2018/1/9-10.
8. 松尾宏、「光子統計と赤外線強度干渉計」, 第 7 回可視赤外線観測装置技術ワークショップ 2017、京都大学(京都府京都市)、2017/11/16-17.
9. Matsuo, H., Ezawa, H., Kiuchi, H., Honma, M., Murata, Y., “Proposal of Photon Counting Terahertz Interferometry”, The Cosmic Wheel and Legacy of the AKARI archive: from galaxies and stars to planets and life, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2017/10/17-20.
10. 江澤元、松尾宏、浮辺雅弘、藤井剛、志岐成友、「テラヘルツ光子計数型検出器の基礎開発-III」, 日本天文学会 2017 年秋季年会、北海道大学札幌キャンパス(北海道札幌市) 2017/9/11-13.
11. 松尾宏、江澤元、木内等、本間希樹、村田泰宏、「テラヘルツ強度干渉計による画像合成手法」, 日本天文学会 2017 年秋季年会、北海道大学札幌キャンパス(北海道札幌市) 2017/9/11-13.
12. Matsuo, H., “THz Interferometry from Dome A”, Annual General Meeting of AFoPS 2017, China Maritime Museum, Shanghai, China, 2017/9/7-8.
13. Ezawa, H., Matsuo, H., Ukibe, M., Fujii, G., Shiki, S., “Progress towards Photon Counting Detectors for Terahertz Astronomy”, 17th International Workshop on Low Temperature Detectors, Kurume City Plaza, Kurume, Fukuoka, 2017/7/17-21.
14. Matsuo, H., Ezawa, H., Kawamura, Y., Kubo, D., Okada, N., Shimomukai, R., “Compact 0.8 K Helium-4 Sorption Cooler”, 17th International Workshop on Low Temperature Detectors, Kurume City Plaza, Kurume, Fukuoka, 2017/7/17-21.
15. Matsuo, H., “Study on Exoplanet Imaging using Intensity VLBI”, Black Hole Astrophysics with VLBI: Past, Present, and Future, National

- Astronomical Observatory of Japan, Mitaka, Tokyo, Japan, 2017/3/27-29.
16. 江澤元、松尾宏、浮辺雅弘、藤井剛、志岐成友、「テラヘルツ光子計数型検出器の基礎開発-II」、日本天文学会 2017 年春季年会、九州大学伊都キャンパス(福岡県福岡市)、2017/3/15-18.
 17. 松尾宏、「南極テラヘルツ干渉計の提案」、南極 30m 級テラヘルツ望遠鏡によるサイエンス、国立極地研究所(東京都立川市)、2017/3/2-3.
 18. 松尾宏、「スペーステラヘルツ干渉計の提案」、2016 年度宇宙電波懇談会シンポジウム、国立天文台三鷹(東京都三鷹市)、2017/2/22-23.
 19. 松尾宏、「強度干渉計によるテラヘルツ光源の物理状態の解明」、H28 年度ミリ波研究会「GHz ~ THz 帯における高電力発振源の開発と応用」、核融合科学研究所(岐阜県土岐市)、2017/1/27.
 20. 松尾宏、江澤元、木内等、本間希樹、村田泰宏、「テラヘルツ強度干渉計の提案」、第 17 回宇宙科学シンポジウム、宇宙科学研究(神奈川県相模原市)、2017/1/5-6.
 21. 松尾宏、「電波光子の統計的振る舞いと強度干渉計による画像合成について」、VLBI 懇談会シンポジウム 2016、山口大学吉田キャンパス(山口県山口市)、2016/12/26-28.
 22. 江澤元、松尾宏、浮辺雅弘、藤井剛、志岐成友、「テラヘルツ光子計数型検出器の基礎開発」、日本天文学会 2016 年秋季年会、愛媛大学城北キャンパス(愛媛県松山市)、2016/9/14-16.
 23. 川村祐太、松尾宏、江澤元、岡田則夫、久保大樹、「光子計数型 SIS 検出器のための 0.8 K 冷凍器の評価」、日本天文学会 2016 年秋季年会、愛媛大学城北キャンパス(愛媛県松山市)、2016/9/14-16.
 24. Ezawa, H., Matsuo, H., Ukibe, M., Fujii, G., Shiki, S., “Developments towards the terahertz intensity interferometry”, SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, Edinburgh International Conference Center, Edinburgh, Scotland, U.K., 2016/6/26-7/1.
 25. Matsuo, H., Ezawa, H., Kiuchi, H., Honma, M., Murata, Y., “Terahertz intensity interferometry for milli-arcsecond resolution”, SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, Edinburgh International Conference Center, Edinburgh, Scotland, U.K., 2016/6/26-7/1.
 26. Matsuo, H., Ezawa, H., Honma, Y., Kiuchi, H., Murata, Y., “Terahertz Intensity Interferometry for Very High Angular Resolution Observations”, The 27th International Symposium on Space Terahertz Technology, Jinling Hotel, Nanjing, China, 2016/4/12-15.
 27. 松尾宏、「テラヘルツ光子計数の技術と応用」、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(東京都調布市)、2016/3/7-8.
 28. Matsuo, H., Ezawa, H., Kojima, T., Kawamura, Y., Sakurai, D., “Readout electronics for THz photon counter”, The 16th Workshop on Submm Wave Receiver Technologies in Eastern Asia, Hilton Hotel Riverside,, Nanjing, China, 2015/11/22-25.
 29. Ezawa, H., Matsuo, H., Ukibe, M., Fujii, G., Shiki, S., “SIS Detectors for Terahertz Photon Counting System”, 16th International Workshop on Low Temperature Detectors, Centre de Congress WTC, Grenoble, France, 2015/07/20-23.
 30. Matsuo, H., Ezawa, H., “Advantages of Photon Counting Detectors for Terahertz Astronomy”, 16th International Workshop on Low Temperature Detectors, Centre de Congress WTC, Grenoble, France, 2015/07/20-23.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：

種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

6. 研究組織

(1) 研究代表者

江澤 元 (EZAWA, Hajime)
国立天文台・チリ観測所・助教
研究者番号：60321585

(2) 研究分担者

松尾 宏 (MATSUO, Hiroshi)
国立天文台・先端技術センター・准教授
研究者番号：90192749

浮辺雅弘 (UKIBE, Masahiro)
国立研究開発法人産業技術研究所・エレクトロニクス・製造領域・研究グループ長
研究者番号：00344226

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()