

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01937

研究課題名（和文）CMB観測の超高感度化に向けた超伝導ラジオメーターの開発

研究課題名（英文）Development of a superconducting radiometer for CMB observations

研究代表者

美馬 覚（Mima, Satoru）

国立研究開発法人情報通信研究機構・未来ICT研究所神戸フロンティア研究センター・研究員

研究者番号：50721578

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：インフレーション宇宙論の解明を目的としていた、大規模CMB偏光観測実験のための技術開発を行った。地上からの高精度なCMB偏光観測には、大気の影響を観測して差し引く必要がある。大気の影響を同じ視野内で差し引くため、望遠鏡内に搭載可能な、超伝導検出器を使ったラジオメーターの技術開発を行った。この実現のために課題となるのは、水蒸気吸収を高精度に計測するためのバンドパスフィルターである。バンドパスフィルターの設計を行い、超伝導検出器に組み込んだデバイスの作成を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究が目指すCMB偏光観測の高感度化は、インフレーション宇宙論の解明を目的としている。インフレーションはビッグバン以前にあったと考えられており、宇宙誕生という未知の解明につながるものである。今回研究開発を行った、ミリ波帯域のフィルター技術は宇宙観測以外の観測実験へ応用が期待できる。またマイクロ波共振器に関連する技術開発は、超伝導量子技術などへの波及効果も期待できる。

研究成果の概要（英文）：We developed technology for a large-scale CMB polarization observation experiment aimed at elucidating the theory of inflationary cosmology. To observe CMB polarization with high precision from the ground, it is necessary to observe and subtract the effects of the atmosphere. To achieve this within the same field of view, we developed a radiometer technology using a superconducting detector that can be mounted on a telescope. The main challenge was to develop a bandpass filter that can measure water vapor absorption with high precision. We designed a bandpass filter and integrated it into a superconducting detector.

研究分野：超伝導検出器

キーワード：超伝導検出器 宇宙マイクロ波背景放射 ラジオメーター 超伝導ラジオメーター

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の偏向成分の精密観測は、宇宙初期のインフレーションで発生した原子重力波の解明ができる唯一の方法である。地上で大規模な観測実験が 2020 年代にかけて計画されている。地上からの大規模スケールの観測には、大気の影響とその除去が必要不可欠である。

宇宙最古の光、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) は初期宇宙の残光であり、その精密観測は時空の性質や物質の起源を説明してきた。これまでの CMB 観測からは、宇宙が誕生直後に時空が加速膨張した“インフレーション”があったと考えられている。インフレーションが作る空間の揺らぎ、原子重力波の痕跡は CMB に偏向の形で保存されていることが示唆されている。CMB の偏向成分の空間分布を観測できれば、インフレーションの直接的な検証が可能になる。CMB の偏向成分の観測の精密化が世界中で行われている。

CMB 偏光の空間分布は、空間対称な E モードと非対称な B モードに分類される。大きな角度スケールでの B モードはインフレーション時に発生した原子重力波を検出する手段として有力視されている。ただし、大角度スケールの CMB 偏光観測を精密に行うためには、銀河からの放射「全景放射」を理解して差し引く必要がある。これまでの観測は、全景放射の理解精度によって頭打ちになっている。世界は、複数帯域で、大角度と極小角度スケールの観測を実現しようとしている。

・地上観測の課題

地上から大角度スケールの観測を実現するためには、大気の影響を抑える必要がある。大気の中でも水蒸気はミリ波帯域で複数の周波数で強くミリ波を吸収する。同時に水蒸気は温度に基づく黒体放射を出すため、吸収帯域をよけて観測する必要がある。CMB 偏光観測はもとも水蒸気の少ない南米チリのアタカマ砂漠や南極などで行われる。ミリ波帯での大気透過率をアタカマ砂漠で実測した結果では、110 GHz、180 GHz 付近に強い吸収がある。

地上から大角度スケールの観測を行う場合、観測全体でのノイズを低減する必要がある。特に 1/f 雑音を抑えることが必要である。検出器では材料レベルでの改良や読み出しシステムの改善が行われている。また、偏光子を高速で回転させてモジュレーションし、1/f 雑音を下げる試みがある。望遠鏡のシステムの 1/f 雑音は低減が進んできたが、大気による 1/f 雑音は依然として大きな課題として残る。観測する周波数帯域において周波数特性を高分解能で観測できれば、観測帯域・視野での大気成分の理解と影響の大幅な低減が可能である。しかし、CMB 偏光観測に用いられるカメラ型の検出器では周波数分解ができない。また、フーリエ分光器などでは他ピクセル化や読み出しスピードに困難がある。

一般に大気の組成の計測にはラジオメーターが利用される。しかし、市販品は 1 チャンネルで 1 帯域での測定であり、超伝導検出器と比較して感度が悪く、スキャンレートも低い。また、ラジオメーターは、3,000 万円程度と高価であるため、容易に導入はできない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、大気の影響を完全に理解するために、望遠鏡と同じ視野を観測可能な超伝導ラジオメーターの開発を目的として、高感度な CMB 偏光観測技術を構築することである。高精度なミリ波観測実験では、超伝導検出器を用いるため、望遠鏡にすでに極低温環境が構築されている。この冷却能力を用いて、超伝導ラジオメーターを冷却する。

超伝導ラジオメーターを実現するにあたり、水の吸収が高い周波数で大気からの放射を評価するためには、きわめて急峻なフィルター特性を持つバンドパスフィルターが必須になる。これは、観測帯域に水の吸収が最も強い部分を含むと検出器応答が飽和してしまい、水蒸気量をはかることが出来ないためである。また、水蒸気量を定量化するには、水蒸気の吸収が増加し始めるポイントを押さえる必要がある。周波数特性を微小に変えたフィルターを持つ検出器を並べることで、水蒸気による吸収の周波数依存性を測定できる。また、超伝導検出器を十分に冷やすためには、赤外光をブロックする光学的なフィルターも必須である。

本研究ではミリ波で十分な感度がある超伝導検出器に、オンチップバンドパスフィルターを接続したデバイスを作成する。また、赤外線的光学フィルターを製作し、オンチップと光学の両面から水蒸気の影響を合わせた、超伝導ラジオメーターの開発を行う。また、検出器の評価も含めた統合的な評価環境の構築も行う。

3. 研究の方法

超伝導ラジオメーターの開発は図 1 のような冷凍機システムを実験室に用意して行う。国立天文台のミリ波観測で実績のある望遠鏡のクライオスタット部分を用いた。冷凍機はパルスチ

ユーブ冷凍機で予冷され、サンプルステージはソーブション冷凍機を用いて 0.3 K まで冷却できる。ミリ波は冷凍機外部から真空窓、赤外線フィルターを通して、超伝導ラジオメーターの検出器に入る。検出器部はレンズで集光されたミリ波が、アンテナに吸収されて 180 GHz を通すバンドパスフィルターを通して、超伝導検出器の検出部分に導入される。検出器部分のミリ波特性については国立天文台のフーリエ分光器とミラーからなるシステムを用いる。

4. 研究成果

研究成果では、バンドパスフィルターを搭載した超伝導検出器の開発、赤外フィルターの開発について述べ、最後に研究期間中に発明した新構造について述べる。

- (1) オンチップでバンドパスフィルターを持つ超伝導検出器の基本的な設計を行った。ここで、ミリ波信号を受信する検出器部分には、超伝導力学インダクタンス検出器 (MKID) を採用した。MKID は、誘電体基板上に成膜した超伝導薄膜に、マイクロ波共振器を微細加工で形成して作る。マイクロ波共振器は、読み出し用の伝送線路に静電結合で結合する。共振器の先端にアンテナを接続して超伝導共振器にミリ波を導入すると、超伝導電子の準粒子が乖離する。この時の、共振特性のシフトを信号応答として読みだす。MKID は共振器の長さを変えることで、複数の共振器を一对の同軸線路で読み出せるため、超伝導ラジオメーターには適している。

- (2) バンドパスフィルターを含むミリ波帯域でのデバイスの設計は、国立天文台で行った。設計には電磁界シミュレーションソフトの COMSOL を用いていた。本デバイスに用いるバンドパスフィルターの透過特性を図 2 に示す。アンテナと、超伝導マイクロ波共振器の間に急峻な特性を持つバンドパスフィルターを挿入することで、アンテナから入射したミリ波の不要部分を、フィルタリングすることが出来る。

- (3) オンチップバンドパスフィルターを含む超伝導検出器 MKID には、超伝導転移温度の異なる超伝導体を組み合わせた Hybrid 構造を採用している。超伝導転移温度と検出可能なミリ波の周波数は比例関係にある。アンテナ部分やフィルター部分には、180 GHz のミリ波で超伝導体の超伝導電子の乖離が起こらないニオブを用い、超伝導共振器の芯線部分にはアルミニウムを用いた。理化学研究所の超伝導検出器微細加工用のクリーンルームを用いて作成した。基板には、誘電損失の小さい高抵抗 FZ 法ノンドーブシリコンを用いた。まず、DC マグネトロンスパッタでニオブ薄膜を製膜する。フォトリソはマスクレス露光装置で行い、露光現相後ドライエッチング装置で加工する。2 層目の Al 薄膜も DC マグネトロンスパッタで製膜して、露光現像時にアルミ薄膜をアルカリ性の現像液でエッチングして完成させた。図 3 に作成したデバイスの写真を示す。

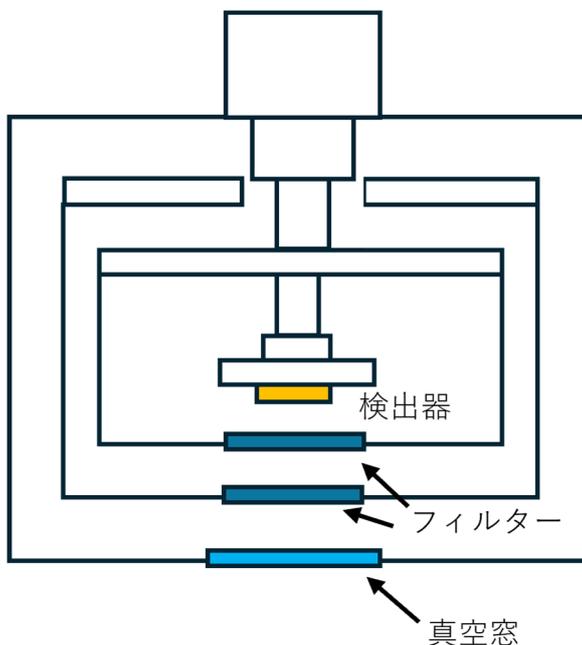


図 1 超伝導ラジオメーターの使用環境を模倣したシステム。冷凍機が上部についており、ミリ波は下部から真空窓を通して導入される。不要な帯域の電波はフィルターで遮られる。

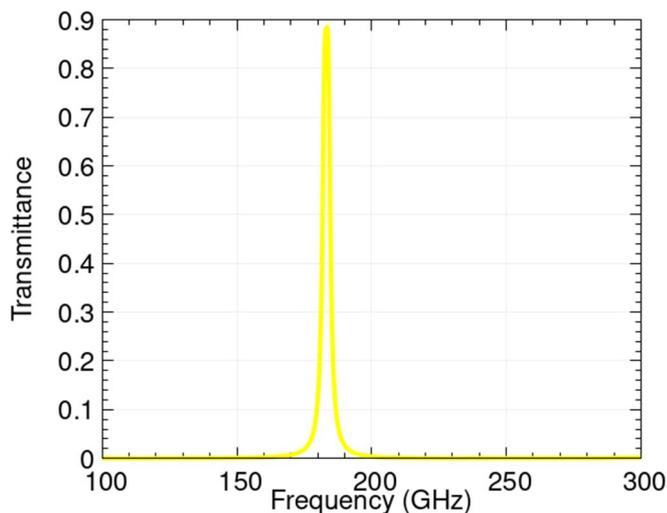


図 2 設計した、検出器基板上的オンチップバンドパスフィルターの透過特性



図 3 試作したハイブリッド構造を持つ超伝導共振器

- (4) 完成したデバイスを治具にマウントしたものを図 4 に示す。検出器はアルミの治具に板バネで固定されており、両側のプリント基板から SMA コネクタにつながっている。同軸線で冷凍機外まで接続して読み出しシステムにつなぐことで、超伝導検出器の共振特性を読み出すことができる。図 5 に検出器の共振特性を示す。

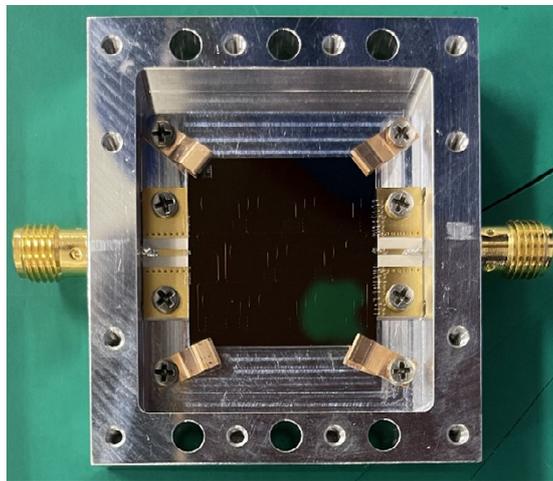


図 4 治具にマウントしたオンチップバンドパスフィルター搭載の超伝導共振器

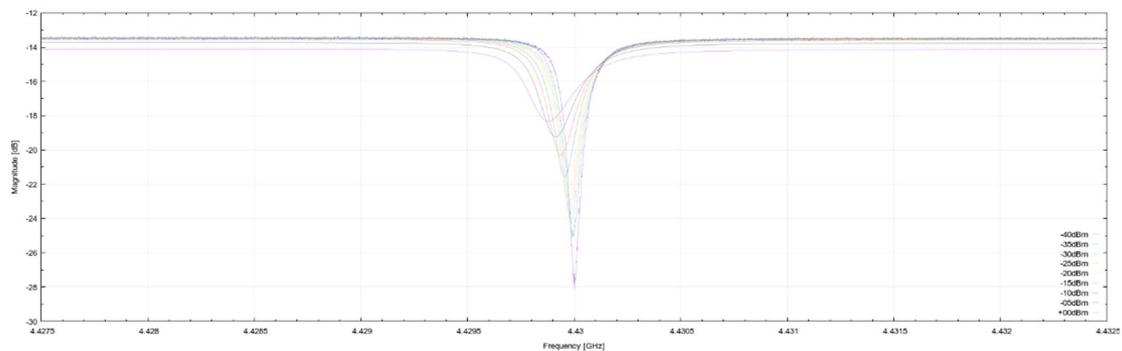


図 5 超伝導共振器の読み出しシステムで得た共振特性

- (5) オンチップバンドパスフィルターの光学評価には、フーリエ分光器を用いる。図 1 で示すように冷凍機にはミリ波導入用の光学窓が開いている。黒体放射源を光源としてフーリエ分光器を介して冷凍機にミリ波を導入することで、バンドパスフィルターを含む超伝導検出器の周波数特性評価が可能である。

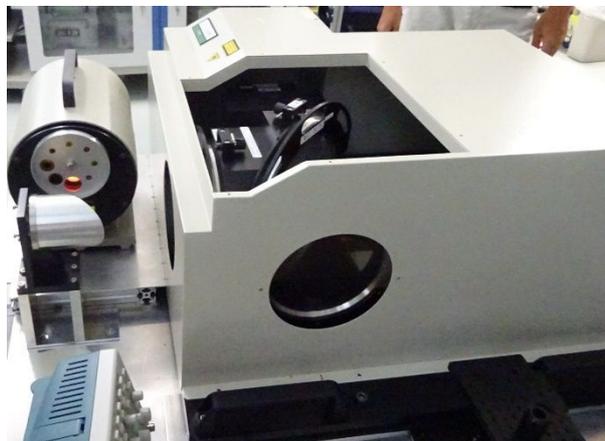


図 6 フーリエ分光器

- (6) 赤外線フィルターは、アルミニウムがポリエチレンに蒸着してあるシート、いわゆるアルミニウムマイラーを微細加工技術で加工した。アルミニウムマイラーは薄いシート状のため、シリコン基板を支持材として、ダイシングに用いるテープでアルミマイラーとシリコン基板を共に固定し、既存のフォトリソグラフィを応用することで作成した。アルミマイラーにスピンコーターでレジストを塗布し、低温で加熱乾燥後に、マスクアライナーでパターンを転写した。現像液はアルカリ性の薬品のため、現像と同時にアルミニウム箔は溶解する。国立天文台のテラヘルツ TDS でその透過特性を評価した（図 7）。



図 7 赤外線フィルターとテラヘルツ TDS を使った透過特性の評価

- (7) アンテナで給電された電磁波は伝送線路を通して検出器に導入されるが、超伝導を使った伝送線路でもミリ波帯になると損失が問題になる。超伝導伝送線路の伝送損失による Q の低減を避ける機構（図 8）を開発し、特許を申請した。本研究範囲ではミリ波伝送路部には適応できていないが、今後ミリ波での伝送損失を抑える構造として期待できる。

Hollow MSL

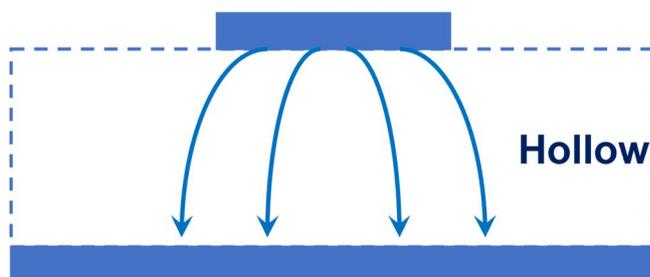


図 8 中空構造の超伝導マイクロストリップライン構造

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1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 Noguchi T., Mima S., Otani C.	4. 巻 31
2. 論文標題 Contribution of Residual Quasiparticles to the Characteristics of Superconducting Thin-Film Resonators	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2021.3058075	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 Uno Shinsuke, Takekoshi Tatsuya, Oshima Tai, Yoshioka Keisuke, Wuy Chin Kah, Kohno Kotaro	4. 巻 59
2. 論文標題 Demonstration of wideband metal mesh filters for submillimeter astrophysics using flexible printed circuits	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 4143~4143
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/AO.389605	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16件（うち招待講演 3件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 大谷知行, 美馬 覚, 田井野徹, 斗内政吉
2. 発表標題 超伝導体の転移温度の人工的制御の実証とマイクロ波力学インダクタンス検出器の研究
3. 学会等名 光・量子ビーム科学合同シンポジウム2021 (OPTO 2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tatsuya Takekoshi, Kianhong Lee, Kah Wuy Chin, Shinsuke Uno, Toyo Naganuma, Shuhei Inoue, Yuka Niwa, Kazuyuki Fujita, Akira Kouchi, Shunichi Nakatsubo, Satoru Mima, Tai Oshima
2. 発表標題 Material properties of a low contraction and resistivity silicon--aluminum alloy for cryogenic detectors
3. 学会等名 19th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD-19) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大島泰, 竹腰達哉, 陳家偉, 宇野慎介, 井上修平, 長沼桐葉, 丹羽佑果
2. 発表標題 超広視野時代のサブミリ波連続波観測の大気放射の除去について
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長沼桐葉, 吉岡佳輔, 酒井剛, 大島泰, 竹腰達哉, 丹羽佑果, 宇野慎介, 陳家偉, 井上修平
2. 発表標題 多色サブミリ波カメラ用超広帯域反射防止技術の開発
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹腰達哉, 李建鋒, 陳家偉, 宇野慎介, 井上修平, 長沼桐葉, 丹羽佑果, 藤田和之, 香内晃, 中坪俊一, 美馬覚, 大島泰
2. 発表標題 超伝導検出器焦点面に適した低熱収縮シリコンアルミ合金の極低温特性評価
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宇野慎介, 陳家偉, 井上修平, 河野孝太郎, 大島泰, 竹腰達哉, 長沼桐葉, 丹羽佑果
2. 発表標題 多色サブミリ波カメラ用超広帯域準光学バンドパスフィルターの開発
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長沼桐葉, 吉岡佳輔, 酒井剛, 大島泰, 竹腰達哉, 丹羽佑果, 宇野慎介, 陳家偉, 井上修平
2. 発表標題 多色サブミリ波カメラ用多段型多孔質膜赤外線フィルターの開発
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 宇野慎介, 大島泰, 竹腰達哉, 陳家偉, 井上修平, 長沼桐葉, 丹羽佑果
2. 発表標題 サブミリ波帯多色カメラ用光学バンドパスフィルターの開発
3. 学会等名 第21回ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹腰達哉, 李建鋒, 陳家偉, 宇野慎介, 井上修平, 長沼桐葉, 丹羽佑果, 藤田和之, 香内晃, 中坪俊一, 美馬覚, 大島泰
2. 発表標題 低熱収縮率シリコンアルミ合金を用いたホーンアンテナアレイの開発
3. 学会等名 第21回ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shuhei Inoue, Kah Wuy Chin, Shinsuke Uno, Kotaro Kohno, Yuka Niwa, Toyo Naganuma, Ryosuke Yamamura, Kazuki Watanabe, Tatsuya Takekoshi, Tai Oshima
2. 発表標題 A design method of an ultra-wideband and easy-to-array magic-T: A 6-14GHz scaled model for a mm/submm camera
3. 学会等名 the 20th International Conference on Low Temperature Detectors (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宇野慎介, 陳家偉, 井上修平, 河野孝太郎, 大島泰, 小野哲, 酒井剛, 長沼桐葉, 山村亮介, 竹腰達哉, 丹羽佑果, 渡邊一輝
2. 発表標題 ミリ波サブミリ波多色カメラに向けたオンチップ準集中定数フィルターの設計
3. 学会等名 日本天文学会2024年春季年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Shinsuke Uno, Kah Wuy Chin, Tai Oshima, Satoshi Ono, Takeshi Sakai, Akira Endo, Kenichi Karatsu, Jochem J. A. Baselmans, Tatsuya Takekoshi, Kotaro Kohno, Shuhei Inoue, Toyo Naganuma, Yuka Niwa, Ryosuke Yamamura, Kazuki Watanabe
2. 発表標題 Design of on-chip lumped element bandpass filters for multichroic imaging in submillimeter astronomy
3. 学会等名 36th International Symposium on Superconductivity (ISS2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 C. Otani, S. Mima, T. Taino, R. Murayama, T. Noguchi
2. 発表標題 Nb thin-film superconducting microwave resonator with high quality factor for kinetic inductance detectors
3. 学会等名 15th International Workshop on High Temperature Superconductors in High Frequency Field (HTSHFF 2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 C. Otani, S. Mima, T. Taino, R. Murayama, T. Noguchi
2. 発表標題 An Ultra-high-Q Thin-film Superconducting Resonator for Terahertz Detectors
3. 学会等名 10th International Symposium on Terahertz-Related Devices and Technologies (TeraTech 2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大谷知行, 美馬 覚, 田井野徹, 村山亮介, 野口 卓
2. 発表標題 高い共振Q値を有するオンチップ超伝導マイクロ波共振器の研究開発
3. 学会等名 R5年度 応用物理学会 北陸・信越支部セミナー (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中城悠翔, 美馬 覚, 大谷知行, 亀井雄斗, 伊藤凌太, 野口 卓, 小林達哉, 田井野徹
2. 発表標題 誘電体フリー超伝導共振器の中空構造に関する研究
3. 学会等名 低温工学・超電導学会研究発表会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 超伝導受動素子、超伝導受動素子の製造方法、およびその受動素子を含む機器	発明者 美馬覚, 田井野徹, 村山亮介, 野口卓, 大谷知行	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2022-129567	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
研究分担者	大島 泰 (Oshima Tai) (40450184)	国立天文台・先端技術センター・助教 (62616)	
研究分担者	大谷 知行 (Otani Chiko) (50281663)	国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究センター・チームリーダー (82401)	

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
---------	---------