

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月18日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06291

研究課題名(和文)高温動作を実現する局部発振器内蔵型テラヘルツ帯超伝導ヘテロダイン受信機の開発

研究課題名(英文) Research of THz superconducting heterodyne receivers with high temperature operation

研究代表者

島影 尚 (Shimakage, Hisashi)

茨城大学・理工学研究科(工学野)・教授

研究者番号：80359091

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：高温超伝導体を用いて簡便な冷凍機で動作する発振器を内蔵した高性能テラヘルツ帯ヘテロダイン受信機実現のための研究を行った。検出器としては、YBCOジョセフソン接合の作製研究を行った。発振器としては、BSCCO固有ジョセフソン接合の作製研究を行った。YBCO接合に関しては装置の関係でジョセフソン接合は得られなかったが、BSCCOは希塩酸改質法により高品質の接合作製が可能となった。発振器と検出器をBSCCOのジョセフソン接合により作製し、その電磁波放射実験を行うための測定系の構築を行った。また、将来の検出器の効率向上を目指して、中赤外光でのアレーアンテナに関する実験を行い、効率の向上を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電磁波検出器動作や高周波発振などは超伝導現象を用いることで実現が可能であるが、その特徴を用いて高温超伝導体の潜在的パフォーマンスを組み合わせた受信機を実現することは大きく期待されている。テラヘルツ波での高感度な検出を必要とするものとしては、災害時などに発生するシアン化水素ガスなどの特定の有毒ガスの高感度検知や、危険物検知のためのテラヘルツ帯イメージングなどが考えられ、本研究により汎用的な受信機の実現研究が進むことが期待できる。

研究成果の概要(英文)：The research objective is a realization of high-temperature superconductors heterodyne mixing receivers with THz oscillators. As the receiver elements, the fabrication of YBCO Josephson junctions was investigated. As the oscillator elements, the fabrication of BSCCO intrinsic Josephson junctions was investigated. As for YBCO junctions, due to the lack of an appropriate etching system, the Josephson junctions were not obtained. On the other hand, BSCCO intrinsic Josephson junctions were successfully obtained by using a dilute HCl modification method. Using fabricated BSCCO intrinsic Josephson junctions for both of the receiver and the oscillator, a measurement set-up was constructed in the cryo-cooler, and the measurements were implemented. Moreover, in order to improve the receiver efficiency by an integration of array antenna, the experience for the array antenna was implemented in the range of the mid-infrared, and the improvement of the efficiency was confirmed.

研究分野：エレクトロニクス

キーワード：超伝導デバイス テラヘルツ 受信機

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

電磁波検出技術には、大きく分けて、狭帯域検出のヘテロダイン検出と、広帯域検出のピデオ検出がある。ヘテロダイン検出は、観測する信号(周波数： $f_{RF}$ )と外部参照(LO)信号(周波数： $f_{LO}$ )を同時に照射した時に出力される中間(IF)信号(周波数： $f_{IF} = f_{RF} - f_{LO}$ )により信号検出を行う方式で、LO信号の位相と周波数の精度に従った検出ができる。ヘテロダイン検出はその高性能性のため、電波天文における応用や、物体そのものから発生する電磁波を検出し画像化する受動型イメージング応用などにおいて必要不可欠な検出方式となっている。ヘテロダイン受信機としては、現状ではNb系超伝導材料(臨界温度：9K)で作製された超伝導ジョセフソン接合が高速性、高感度性、低消費電力性などの究極の性能を示し、電波天文観測においては、すでに20年以上の実用観測の実績を有している。しかし、Nb系超伝導材料を用いたジョセフソン接合では、動作温度が液体ヘリウム温度(4.2K)と低く、商用的な使用は難しい。また、Nbの超伝導エネルギーギャップに起因する応答上限周波数が700GHzであり、近年急速に興味が高まっているテラヘルツ帯電磁波の検出機としては応用ができない。本研究で視野に入れている検出周波数はテラヘルツ波領域であるが、これは、被曝なしの非破壊検査や高感度の危険ガス検知などが可能な領域であり、その応用範囲の拡大は近年著しい。一般に、テラヘルツ帯ヘテロダイン素子としては、半導体を用いたショットキーダイオードが使用可能であり、それは液体ヘリウムを必要としないなどのメリットもある。しかし、ショットキーダイオードは、ジョセフソン接合に比べて非線形性が弱いことから変換効率が低く、ジョセフソン接合の受信機で得られている量子雑音近くまで達する低雑音特性は得られていない。

一方、高い臨界温度を持つ超伝導体で作製されたジョセフソン接合を用いた受信機は、動作温度が高くなるだけでなく、応答上限周波数も高くなることが知られている。高温超伝導の一つであるYBaCuO(YBCO、応答上限周波数：10THz、臨界温度：90K)のジョセフソン接合に関しては、300GHz帯における低雑音動作の実証や、THz帯での電磁波応答などの結果が報告されており、臨界温度の高い超伝導体によりヘテロダイン検出をテラヘルツ帯に拡張できる可能性が示されている。

ヘテロダイン受信機の動作においては、一般にLO信号としての電磁波源が必要であるが、超伝導ジョセフソン接合は、電磁波検出動作だけでなく、交流ジョセフソン効果を利用したジョセフソン発振器としての動作も実現されており、その発振をヘテロダイン受信機のLO信号として利用する可能性も考えられる。高温超伝導体を用いては、単結晶BiSrCaCuO(BSCCO)による固有ジョセフソン接合(Intrinsic Josephson Junction:IJJ)からの0.5THzでの発振の報告があり、その発振出力が80 $\mu$ Wに達すると報告されている。

### 2. 研究の目的

本研究では、高温超伝導体を用いて、簡便な冷凍機で汎用的に使用できる高温動作のテラヘルツ帯ヘテロダイン受信機実現を目的とする。提案する受信機は、テラヘルツ波電磁波受信としてはYBCOジョセフソン接合を用い、ヘテロダイン検出のためのLO信号発振器としては、BSCCOの固有ジョセフソン接合を用いることを目標とする。提案する受信機は、ヘテロダイン動作に必要な局部発振器を内蔵することとなるため、外部参照信号発振器なしに、簡便な冷凍機(40K程度の動作温度を想定)での動作が可能という特徴を持つ。本研究では、提案のヘテロダイン受信機を作製するために、検出器と発振器を作製し、それらの動作を組み合わせた研究を行う。また、受信機の効率向上を目的としたアレーアンテナに関する知見を得るために、中赤外光におけるアレーアンテナ動作の確認も行う。

### 3. 研究の方法

提案の受信機の検出器部分として、YBCO超伝導薄膜を用いた粒界接合型ジョセフソン接合(テラヘルツ検出器として機能)を作製し、電磁波応答特性などの評価を行う。LO発振器としては、自己フラックス法により作製されたBSCCO単結晶を用いて固有ジョセフソン接合を作製し、その作製条件の最適化を行う。固有ジョセフソン接合素子とYBCO受信機と組み合わせ、固有ジョセフソン接合素子からの発振周波数の同定や電磁波とのカップリングの評価を行い、最適化を行う。

### 4. 研究成果

#### (1) YBCO ジョセフソン接合作製法の確立

YBCOジョセフソン接合に関しては、段差型ジョセフソン接合の作製に向けて、実験を行った。接合は、MgO基板上に対し、段差形状を作製し、その上にエピタキシャル成長するYBCO薄膜が段差上で粒界型ジョセフソン接合となることを利用するものである。良好なジョセフソン接合となるためには、急峻な基板段差が必要である。図1に、スパッタエッチングにより作製し

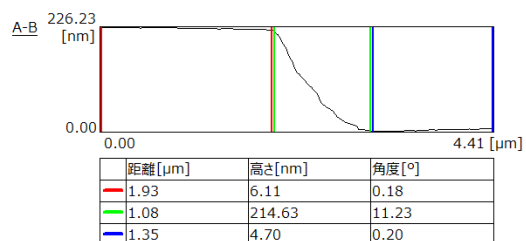


図1 AFMによるMgO基板の段差形状

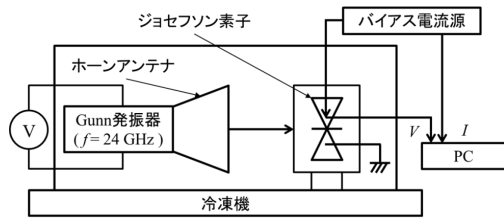


図2 冷凍機内の照射系セットアップ

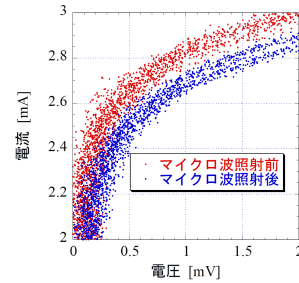


図3 YBCO 薄膜ブリッジの電磁波応答

た段差形状の AFM の測定結果を示す。様々な条件での実験を行ったが、段差角度が 11 度と急峻でなく、YBCO ジョセフソン接合は得られなかった。これは、使用しているスパッタエッチングの非等方エッチングの結果であり、本研究期間中には、直線性に優れたエッチングが行われるイオンビームエッチング装置の導入ができなかったことが原因である。ジョセフソン接合の電磁波応答を精査する目的で図 2 に示すように、冷凍機内にガン発振器からの 24GHz 電磁波を照射できる照射系を作製した。図 3 に示すように、YBCO 薄膜をエッチングした  $4\mu\text{m}$  ブリッジに電磁波を照射し、応答を確認した。最適なジョセフソン接合の作製は、継続して実験を続けている。

### (2) BSCCO イントリンシックジョセフソン接合作製法の確立

従来行っていた BSCCO イントリンシックジョセフソン接合の作製法が、金属薄膜などの蒸着法による膜剥がれなどの問題があったため、希塩酸改質による接合作製法の確立に取り組んだ。希塩酸改質とは、超伝導体 BSCCO を希塩酸に浸漬することによって、絶縁体 BiOCl に改質する現象である。いくつかの予備実験の元、改質のための希塩酸の最適な濃度を 0.1% と決定した。10 mm 角のガラス基板の上に数 mm 角の BSCCO 単結晶をポリイミド樹脂によりマウントし、結晶を劈開した後、抵抗加熱蒸着装置で Ag を  $800 \text{ \AA}$  を蒸着する。その後、フォトリソグラフィの工程を経て、接合パターンを作製する。スパッタエッチング装置を使用してエッチングを行い、Ag だけを削り、接合部以外の BSCCO 単結晶の表面を露出させる。希塩酸に浸漬して接合部以外の BSCCO 単結晶を改質する。最終的に、電極となる Ag 薄膜を蒸着し、パターンニングを行い、素子が完成する。様々な最適化の実験により、接合作製の条件を確定した。得られた接合の電流電圧特性を図 4 に示す。金属系超伝導体で作製された SIS ジョセフソン接合で得られるような典型的なヒステリシス特性が観測された。電流変化時に電圧ジャンプが生じた後に電流を反転させることを複数回繰り返す測定法により、I-V 特性のブランチ構造を確認した。IJJ 素子の電圧ジャンプの幅より、この接合の直列数を見積もったところ、約 21 個となった。また、作製された IJJ 素子に含まれる接合の臨界電流のばらつきを評価したところ、接合の臨界電流のばらつきは比較的少ないものではあるが、24 mA 付近と 30 mA 付近の 2 か所に集中している結果が得られた。これは、Ag 電極作製時のエッチングの影響や、希塩酸改質での接合作製時のエッチングの影響などで接合幅が 2 段になってしまったことなどが原因である。接合数は改質時間に比例するため改質時間を長くすることで均一性が高まってくると期待される。

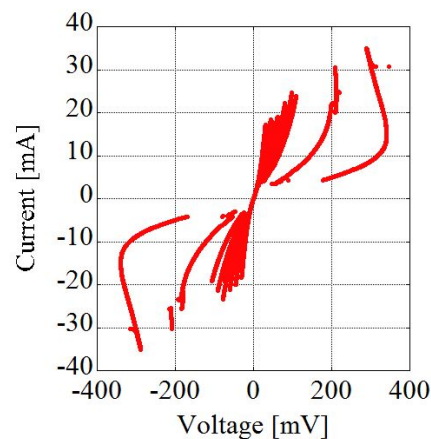


図4 BSCCO イントリンシック接合の特性

### (3) ジョセフソン接合からの電磁波照射実験

当初、YBCO ジョセフソン接合による電磁波受信を予定していたが、接合作製が困難であったため、受信機も BSCCO 固有ジョセフソン接合を用いて、照射実験を行った。冷凍機の実装写真を図 5 に示す。発振器に対しては、接合サイズを  $80 \times 250 \mu\text{m}^2$  とした。また、受信機は接合サイズを  $10 \times 50 \mu\text{m}^2$  とした。発振器に対しては、接合自身が矩形型の共振器として働くために、発振周波数が 0.5THz となるように作製したサイズを設計した。検出器に関しては、空間と素子とのインピーダンスマッチングを良くする目的で、

IJJ発振器 IJJ検出器

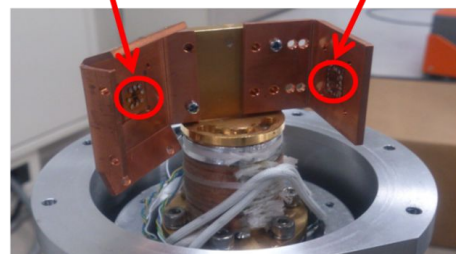


図5 電磁波照射実験の写真

小さなサイズの接合を作製した。両接合とも、臨界温度が約85Kの良好な接合であった。また、その電流電圧特性から、発振器と検出器の直列接合数はそれぞれ、約45個と40個と見積もった。これらの接合を用いて、図5に示すように構築した照射系により、実験を行った。発振器は外部の電流源により電流バイアスを行い、バイアス電圧値を0 mV ~ 500 mV とし変化させた。それぞれのバイアス点において、受信機の電流電圧特性を観測し、その変化により、電磁波の応答実験を行った。図6にその結果を示す。41.4 mV 付近のバイアス点では、発振電磁波と発振器の共振周波数が等しくなる箇所である。予想される照射パワーと検出器の効率から考察を行い、検出器と発振器の位置の調整や、検出器にアンテナなどを集積化することで、大きな応答が見られると見積もっている。測定系などの構築が完了し、放射実験が行えるようになったため、放射効率などの同定のための実験を続けている。

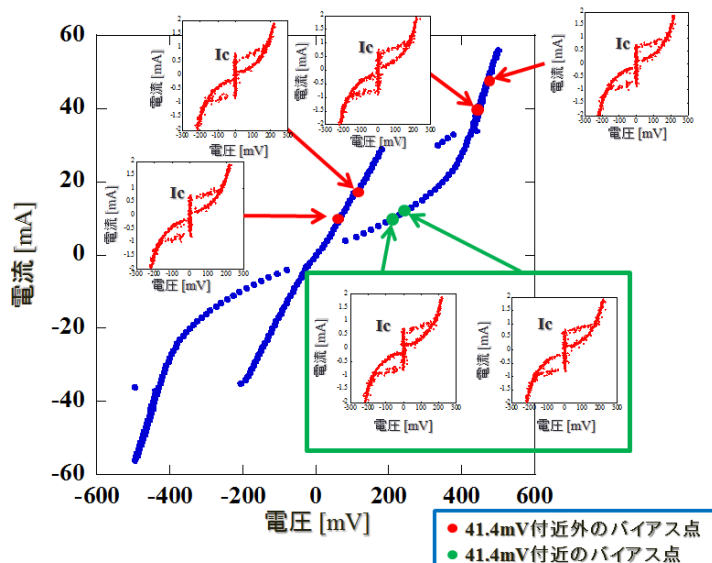


図6 電磁波照射実験による電流電圧特性の変化

#### (4) 電磁波検出効率上昇のためのアレーアンテナ

電磁波検出に対しての高効率化達成のためには、アンテナの使用が重要である。本研究課題での超伝導検出器に対して、将来の高効率化を視野に入れて、アンテナの集積化とアレー化に向けての検討を行った。最終的には、アンテナと超伝導検出器との集積化を行っていくが、まずは中赤外光におけるアンテナのフェーズアレー化の実験を行い、将来のための指針を得ることを目的とした。アンテナの評価を行うために図7のような測定系を構築した。中赤外光としては、波長  $4.89\mu\text{m}$  の量子カスケードレーザーを使用した。入射レーザー光がサンプルに対する垂直成分以外を除去するように、サファイアを用いた半球レンズを使用した。検出器出力はロックインアンプの出力により測定した。検出器は、本実験においては、アンテナは  $4.89\mu\text{m}$  の波長の中赤外光に対するダイポールアンテナとして動作するように、厚さ  $50\text{nm}$  金薄膜を幅  $0.1\mu\text{m}$ 、長さ  $2.4\mu\text{m}$  となるように電子ビーム描画装置で加工した。検出器部分は  $0.1\mu\text{m}$  の長さのチタン薄膜を抵抗体として用い、ポロメータ型検出器とした。図7の右側に示すように、基板の中心にチタンをポロメータとするダイポールアンテナがあり、その上下に反射用アンテナとしての共振器が配置されている。ダイポールアンテナと反射用アンテナは半波長の距離を離して配置しており、反射用アンテナに入射した中赤外光は、反射用アンテナで共振した後、再放出が起こり、ダイポールアンテナへ電磁波としてエネルギーが伝搬する。アンテナ間が半波長離れている効果により、半球レンズ側に強い指向性が起こることが期待できる。実際に測定した指向性の実験結果を図8に示す。図7における検出器の回転軸に対して、検出器を回転させたときのチタンポロメータの検出特性から指向性は見積もった。図8における  $0^\circ$  は垂直入射に対応する。前面利得が高くなっていることが確認でき、波長のフェーズアレー化に対する利得の向上が期待できる結果が得られた。

本研究課題において、高温超伝導体を用いた局部発振器付きの検出器の研究を行ったが、YBCO ジョセフソン接合は、エッチング装置の不具合により、接合は得ることができなかった。しかし、BSCCO 固有ジョセフソン接合の高品質な作製は本研究で可能となったために、受信機と検出器に対して固有ジョセフソン接合を用いて作製し、その電磁波放射実験系を整備した。

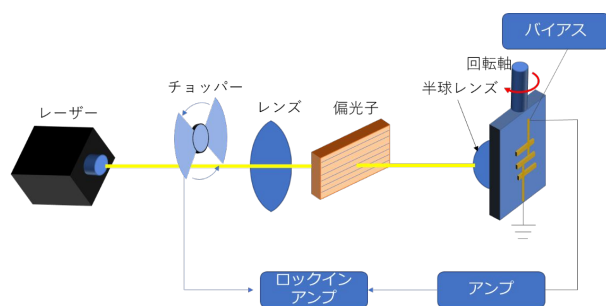


図7 中赤外光アレーアンテナ検出の測定系

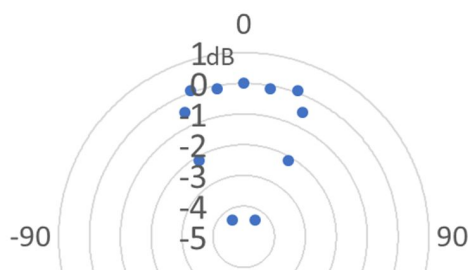


図8 アレーアンテナの指向性測定結果

更に、受信機の利得向上のためのアレーアンテナ構造の提案を行い、中赤外光により、その有効性を示すことができた。本研究課題の遂行により、今後、継続して、超伝導受信機としての研究を行う体制を整えることができたので、今後の研究を更に続けていく。

## 5. 主な発表論文等

### [雑誌論文](計7件)

川上彰、堀川隼世、島影尚、田中秀吉、鶴澤佳徳、『中赤外超伝導ホットエレクトロンボロメータミキサの評価』、日本赤外線学会誌、28、2、53 (2019)、査読有。

堀川隼世、川上彰、兵頭政春、島影尚、『中赤外光領域における金属材料特性に基づいた光検出器用アンテナ特性評価』、日本赤外線学会誌、27、1、74 (2017)、査読有。

R. Hiwatashi, Y. Tamura, H. Shimakage, 『Simulations of chaos generation from Josephson junctions with various junction parameters』、J. of Phys.: Conf. Ser., 87, 012079 (2017)、査読有。

R. Obara, J. Horikawa, H. Shimakage, A. Kawakami, 『Evaluation of detectable angle of mid-infrared slot antennas』、J. of Phys.: Conf. Ser., 87, 012080 (2017)、査読有。

T. Goto, M. Takeda, S. Saito, H. Shimakage, 『Calculations of superconducting parametric amplifiers performances』、J. of Phys.: Conf. Ser., 87, 012081 (2017)、査読有。

A. Kawakami, H. Shimakage, J. Horikawa, M. Hyodo, S. Saito, S. Tanaka, Y. Uzawa, 『Design and Fabrication for the Construction of MIR HEB Mixers』、IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 27, 3, 2300105 (2017)、査読有。

A. Kawakami, H. Shimakage, J. Horikawa, M. Hyodo, S. Saito, S. Tanaka, Y. Uzawa, 『Fast response of superconducting hot-electron bolometers with a twin-slot nano-antenna for mid-infrared operation』、AIP Advances 6, 125120 (2016)、査読有。

### [学会発表](計20件)

石田亮、後藤隆志、島影尚、武田正典、『Measurements of phase shifts in YBCO transmission lines for evaluation of kinetic inductances』、The 13th International Superconductivity Symposium, 2018年12月14日、つくば市

高橋優、島影尚、『超伝導ジョセフソン接合の高周波応答特性評価に向けた測定系の構築』、第26回電気学会東京支部茨城支所研究発表会、2018年11月17日、日立市シビックセンター

佐久間由哲、島影尚、『BSCCO 固有ジョセフソン接合外部磁場応答特性の測定系構築と評価』、第26回電気学会東京支部茨城支所研究発表会、2018年11月17日、日立市シビックセンター

姉帯駿、大内琢郎、島影尚、『BSCCO 固有ジョセフソン接合素子による電磁波放射実験』、第26回電気学会東京支部茨城支所研究発表会、2018年11月17日、日立市シビックセンター

更屋秀人、川上彰、堀川隼世、島影尚、『中赤外フェーズドアレイアンテナの設計と作製』、第79回応用物理学会秋季学術講演会、2018年9月19日、名古屋国際会議場

姉帯駿、大内琢郎、島影尚、『固有ジョセフソン接合による電磁波放射実験』、第79回応用物理学会秋季学術講演会、2018年9月19日、名古屋国際会議場

堀川隼世、川上彰、島影尚、『中赤外領域におけるコプレーナ線路の特性評価』、第79回応用物理学会秋季学術講演会、2018年9月19日、名古屋国際会議場

川上彰、島影尚、堀川隼世、兵頭政春、齋藤伸吾、田中秀吉、鶴澤佳徳、『Mid Infrared Superconducting Hot Electron Bolometer Mixers with nanoantennas』、19th Coherent Laser Radar Conference, 2018年6月20日、沖縄科学技術大学院大学

川上彰、島影尚、堀川隼世、田中秀吉、鶴澤佳徳、『中赤外超伝導ホットエレクトロンボロメータミキサの評価』、電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会、2018年4月20日、機械振興会館

高橋優、島影尚、『高温超伝導ジョセフソン接合作製に向けた YBCO 薄膜の特性評価』、第25回電気学会東京支部茨城支所研究発表会、2017年11月18日、日立市シビックセンター

大内琢郎、日澤光紘、島影尚、『BSCCO 固有ジョセフソン接合素子を用いた THz 波発振実験』、第25回電気学会東京支部茨城支所研究発表会、2017年11月18日、日立市シビックセンター

堀川隼世、川上彰、兵頭政春、島影尚、『超伝導中赤外光検出器用アンテナの検討 I』、第78回応用物理学会秋季学術講演会、2017年9月6日、福岡国際会議場

高谷寛、島影尚、『高周波応用に向けた希塩酸改質による固有ジョセフソン接合作製』、第64回応用物理学会春季学術講演会、2017年3月15日、パシフィコ横浜

後藤隆志、武田正典、島影尚、『YBCO 薄膜コプレーナ線路における非線形カインティックインダクタンスの測定実験』、第64回応用物理学会春季学術講演会、2017年3月15日、パシフィコ横浜

川上彰、島影尚、堀川隼世、兵頭政春、齋藤伸吾、田中秀吉、鶴澤佳徳、『中赤外超伝導ホットエレクトロンボロメータミキサの検討』、電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会、2017年1月9日、機械振興会館

高谷寛、島影尚、『希塩酸改質を用いた BSCCO 固有ジョセフソン接合の作製』、第 24 回電気学会東京支部茨城支所研究発表会、2016 年 12 月 17 日、日立市シビックセンタ  
大内琢郎、日澤光紘、島影尚、『BSCCO 固有ジョセフソン接合を用いたテラヘルツ発振素子の特性評価』、第 24 回電気学会東京支部茨城支所研究発表会、2016 年 12 月 17 日、日立市シビックセンタ  
川上彰、島影尚、堀川隼世、兵頭政春、齋藤伸吾、田中秀吉、鵜澤佳徳、『Superconducting hot-electron bolometers with a twin-slot nano-antenna for mid-infrared operation』、1st Asia ICMC and CSSJ 50th Anniversary Conference、2016 年 11 月 9 日、金沢市  
堀川隼世、川上彰、兵頭政春、島影尚、『超伝導中赤外光検出器用アンテナの検討』、第 77 回応用物理学会秋季学術講演会、2016 年 9 月 14 日、朱鷺メッセ国際会議場  
大内琢郎、日澤光紘、島影尚、『IJJ 素子からのテラヘルツ波放射観測実験』、第 77 回応用物理学会秋季学術講演会、2016 年 9 月 14 日、朱鷺メッセ国際会議場

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：川上 彰

ローマ字氏名：Kawakami, Akira

所属研究機関名：独立行政法人情報通信研究機構

部局名：未来 ICT 研究所

職名：主任研究員

研究者番号 ( 8 桁 ): 90359092

研究分担者氏名：武田 正典

ローマ字氏名：Takeda, Masanori

所属研究機関名：静岡大学

部局名：工学部

職名：准教授

研究者番号 ( 8 桁 ): 80470061

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。