

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 25 日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420330

研究課題名(和文)量子雑音限界を目指した高感度テラヘルツ検出器の研究

研究課題名(英文)Research on highly sensitive terahertz detector aiming at quantum noise limit

研究代表者

鵜澤 佳徳 (Uzawa, Yoshinori)

国立研究開発法人情報通信研究機構・ソーシャルイノベーションユニットテラヘルツ研究センターテラヘルツ連携研究室・室長

研究者番号：00359093

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、テラヘルツ帯でこれまで世界最高性能を示したSISミキサを改良することで、さらなる性能向上を目指した開発を実施した。従来同調回路部に用いていた高周波損失のあるAlを置き換えるためのNbTiNが、テラヘルツ帯で低損失であることを実験的に明らかにした。NbTiN配線とNb接合を接続した際のエネルギーギャップ差により生じる接合の電流-電圧特性の劣化をNb電極の厚さを増大することで低減することに成功した。新たに設計・試作したSISミキサは若干のギャップ電圧の低下を示したが、これは現時点での作製プロセスの制約から上下部のNb電極の厚さが不十分であることが原因であり、今後の有益な開発指針を得た。

研究成果の概要(英文)：In this study, a terahertz SIS mixer have been developed aiming at further improvement of the sensitivity by improving the current SIS mixer with the best performance in the world so far. It was experimentally revealed that our NbTiN films for replacing Al with RF loss used in the tuning circuit has low loss in the terahertz band. We succeeded in reducing the degradation of the current-voltage characteristics of Nb tunnel junctions, caused by connecting NbTiN wirings due to the superconducting energy gap difference between Nb and NbTiN, by increasing the thickness of the Nb electrodes. Although our newly-designed prototype SIS mixers still showed slight reduction of the gap voltage in the current-voltage characteristics due to the fact that the upper and lower Nb electrodes were not able to be made thick enough due to the restriction of the fabrication process at the present time, this result suggests a useful guideline for the future development.

研究分野：超伝導エレクトロニクス

キーワード：テラヘルツ 超伝導 窒化ニオブチタン

1. 研究開始当初の背景

これまで技術的未開拓電磁波領域と呼ばれていたテラヘルツ帯は近年、パラメトリック発振器や量子カスケードレーザなどの比較的強いテラヘルツ光源の出現によって、急速に発展を遂げている。特にテラヘルツ分光を可能にしたフェムト秒パルスレーザによるテラヘルツ波の発生、検出技術(時間領域分光法)では、主に高い強度の光源開発によって信号対雑音(S/N)比を上げ、容易にテラヘルツ分光を行なえる状況を作り出した。現在は商業ベースでテラヘルツ時間領域分光装置の入手が可能となっており、非破壊検査や薬品の成分分析など実用段階に入っている。一方で、外部光源を使わず(使えず)、測定対象物が自ら放射するテラヘルツ光を計測するパッシブな分光技術の発展も、学術上極めて重要である。たとえば宇宙物理学、天文学などの分野においては、天体からの非常に微弱なテラヘルツ信号を高分解能分光するため、量子雑音限界の感度を有するヘテロダイン分光技術を必要としている。これまで不可能であった星間ガスにおける原子分子のテラヘルツ帯スペクトル線の観測などが可能となれば、宇宙における銀河の形成、星・惑星系の誕生、およびそこでの物質進化、さらには生命の起源などの重要な問題が次々と解明され得る。宇宙天文分野に限った話ではない。生物科学分野においても、生体分子の振動・回転などに伴う極微弱なテラヘルツ放射を計測することによって、生体物質中で起こるアデノシン三リン酸(ATP)などの非常に小さなエネルギー消費に伴う化学反応や代謝のメカニズムなどの解明が期待されている。このような短時間に変化を伴う発光現象を計測するためには時間分解能が必要で、積分時間を増やしてS/N比を改善する手法が使えない。このため検出器には究極の感度、すなわち量子力学的極限の雑音性能が要求されている。

このような様々な応用に応えるため、これまでテラヘルツ帯における高感度ヘテロダイン検出器が開発されてきた。我々が開発した超伝導体-絶縁体-超伝導体(SIS)ミキサはテラヘルツ帯において量子雑音の3倍という世界最高性能を示したが、量子雑音限界の感度には到達していない。これは、高周波回路の一部に用いているAlの高周波損失による信号の減衰によって、SIS接合自身が潜在的に有する量子力学的極限性能を十分に引き出せていないためである。この部分を超伝導材料であるNbTiNで置き換え、回路を無損失化すればテラヘルツ帯において理論的限界性能を有する超高感度検出器を実現することが可能である。しかし、新たに配線層とするNbTiNとSIS接合の材料であるNbを直接接続することはできない。両者の超伝導エネルギーギャップの大きさの違いによりポテンシャル井戸が形成され、トンネルしてきた準粒子がSIS接合のNb電極中にトラップさ

れると考えられている。この過剰準粒子が等価的にSIS接合の温度上昇をもたらすために、接合本来の超低雑音動作を妨げているのである。

2. 研究の目的

本研究では、テラヘルツ帯ヘテロダイン検出器の高感度化を阻んでいるSIS接合中の過剰準粒子による加熱効果を抑制するため、新たなデバイス構造を提案する。これによって前人未到達となる量子雑音限界の感度を有するテラヘルツ検出器を目指す。過剰準粒子はエネルギーギャップの大きさが異なる2つの超伝導材料の接続部で形成されるポテンシャル井戸で生ずるため、エネルギーギャップを持たない常伝導金属の特性を利用してこれを解消するデバイス構造を検討、その作製プロセスを確立する。デバイスを試作し、直流特性評価による過剰準粒子の抑制効果を検証、さらに検出器として高周波特性評価を行うことで、従来型に対する本検出器の優位性を明確にすることを目的とする。

3. 研究の方法

テラヘルツ検出器の超高感度化のために必要となる低損失のNbTiN/SiO₂/NbTiNマイクロストリップ伝送線路の獲得を目指し、その作製と高周波特性評価を行う。次に、NbTiNとNbを接続した際のエネルギーギャップ差によってNb電極中にトラップされる過剰準粒子が引き起こすSIS接合の電流-電圧(I - V)特性の劣化を低減するための新たなデバイス構造を提案し、作製、実証する。さらに各材料の物性パラメータを用いて得られた結果をモデル化することによりデバイスを設計、作製し、テラヘルツ帯における高周波特性を評価する。具体的な研究内容としては、次の研究成果で述べる。

4. 研究成果

(1) NbTiN 薄膜の作製と特性評価

低損失同調回路に使用するための伝送線路として、グランドプレーン(下部導体)及びストリップ(上部導体)をNbTiN薄膜、絶縁層をSiO₂とするマイクロストリップ線路を想定して、テラヘルツ時間領域分光法(THz-TDS)を用いた高周波特性評価用のサンプルを準備した(図1)。同図の(a)は下部導体評価用のサンプルで、厚さ1mmの石英基板上に直接成膜したNbTiN膜、(b)は上部導体評価用のサンプルで、厚さ1mmの石英基板上にRFスパッタリング法で成膜した厚さ約150nmのSiO₂上に成膜したNbTiN薄膜である。NbTiN膜は、20wt%のTiと80wt%のNbから成る合金ターゲットを用いた反応性DCマグネトロンスパッタリング法によって意図的な加熱なしで成膜された。NbTiN膜の厚さは、(a)が145nm、(b)が120nmであった。また、NbTiN薄膜の臨界温度(T_c)は共に約14Kであった。

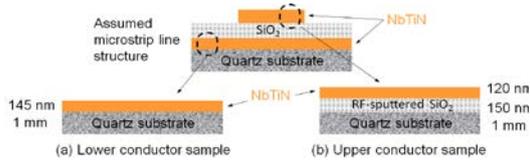


図 1. THz-TDS 測定のために作製されたマイクロストリップ線路を想定した NbTiN サンプル。(a) 下部電極用、(b) 上部電極用。

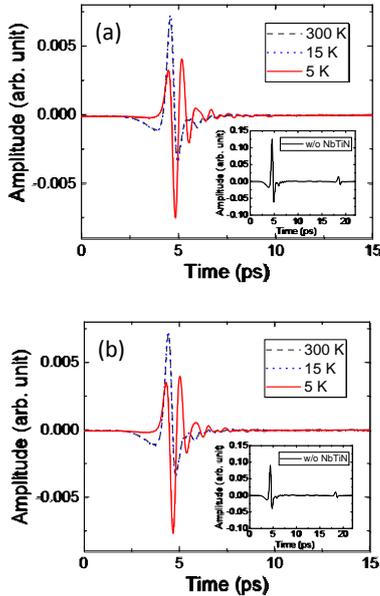


図 2. THz-TDS による時間領域波形。(a) 下部電極用、(b) 上部電極用サンプル。挿入図は石英基板のみの時間波形。

これらのサンプルを透過型 THz-TDS 装置に取り付け、ヘリウムガスによる間接冷却によって約 5 K まで冷却した。図 2 に温度 5 K (超伝導状態) と 15 K および室温 (常伝導状態) での時間領域波形を示す。どちらの NbTiN 薄膜も室温と 15 K での時間波形に大きな違いがないことから、残留抵抗比 (RRR) は 1 程度であることがわかる。また、NbTiN 薄膜の常伝導導電率を、NbTiN を成膜していない石英基板の透過測定結果 (図 2 の挿入図) と比較することによって求めた。その結果、(a) では $0.96 \times 10^6 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ 、(b) では $0.79 \times 10^6 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ が得られ、 SiO_2 をスパッタした上に成膜した NbTiN 薄膜の導電率が若干低い結果となった。これは、スパッタで成膜した SiO_2 の表面が石英基板より粗いためと思われる。

次に常伝導状態 (15 K) をリファレンスとして、超伝導状態 (4 K) の複素導電率 $\sigma(\omega) = \sigma_1(\omega) - j\sigma_2(\omega)$ を導出した (図 3)。(a)、(b) のサンプルについて得られた実部 $\sigma_1(\omega)$ は、約 1.2 THz に明瞭な超伝導ギャップ (2Δ) を示した。これは、マイクロストリップ線路として用いる NbTiN 薄膜が、ギャップ周波数の 1.2 THz まで低損失で動作する可能性を示唆するものである。超伝導ギャップと転移温

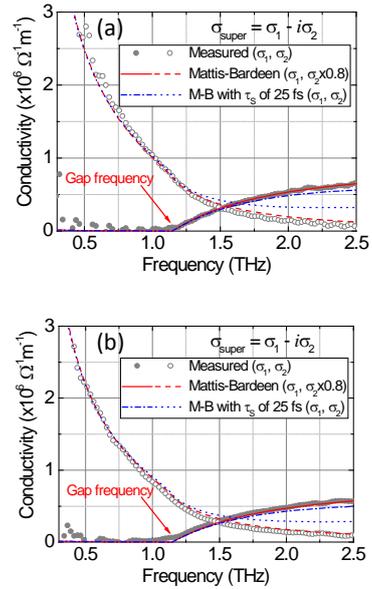


図 3. 導出された複素導電率。(a) 下部電極用、(b) 上部電極用サンプル

度の関係 $2\Delta/k_B T_C$ は 4.1 程度であり、弱結合 BCS 理論 (約 3.52) より大きい。また、虚部の $\sigma_2(\omega)$ に関しては、ダーティリミットの Matis-Bardeen (MB) 理論による計算値より小さいことが見いだされた。 $\sigma_2(\omega)$ は、超伝導マイクロストリップ線路の位相速度やインピーダンスを決める同調回路設計に必要なパラメータとなるため、Ad hoc 的なフィッティングを試みた。その結果、MB 理論に有限の準粒子散乱時間として 25 fs を導入すると、実験結果と良い一致が見られた。または、 $\sigma_2(\omega) = \sigma_2^{\text{MB}}(\omega) \times 0.8$ でも同様であり、回路設計上、有益な知見が得られた。

(2) Nb 接合における加熱効果の抑圧

NbTiN 薄膜と Nb 接合を直接接続する場合には、両者のエネルギーギャップの大きさの違いによってポテンシャル井戸が形成され、トンネルしてきた準粒子が Nb 電極中に閉じ込められる。この非平衡状態が等価的に Nb 接合の温度上昇をもたらすため、Nb 接合の I-V 特性上におけるギャップ電圧の低下や後方屈曲的な振る舞いになると考えられている。研究開始当初は、SIS 接合電極の Nb と配線の NbTiN の間に常伝導金属 (A1) を挿入することで、エネルギーギャップ差を解消させることを検討した。しかし、Nb と A1 を接続した場合、近接効果によって Nb のエネルギーギャップが A1 に染み出し、A1 の厚さと共にそのエネルギーギャップは減少するものの、デバイス作製を想定した数 100 nm 厚程度では十分に解消することは困難であると結論付けた。そこで、SIS 接合の Nb 電極を一般的な 100 nm 以下程度より厚くし、体積を増大することで、過剰準粒子数に対する超伝導電子対数の比を上げ、実効的な接合温度を低下させる効果を検証した。具体的には図 4 に示すように、Nb/A1N/Nb 接合の上部電極を 50 nm、

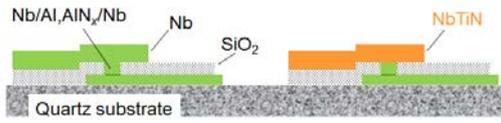


図4. 加熱効果を調べるための SIS デバイス構造。

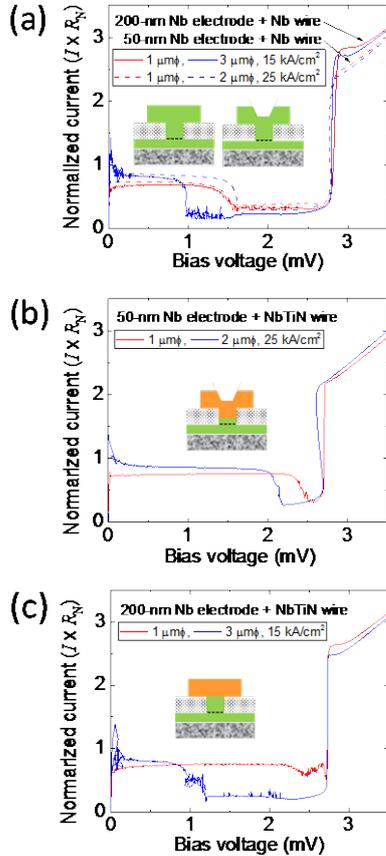


図5. 薄い(50 nm)上部電極と厚い(200 nm)上部電極の Nb/AlN/Nb 接合の I - V 特性。(a) 両方の接合の Nb 配線、(b) 薄い接合の NbTiN 配線、(c) 厚い接合の NbTiN 配線

200 nm の 2 種類の接合に厚さ約 400 nm の NbTiN 配線を施したデバイスを作製し、それらの I - V 特性を比較した。下部電極の厚さは 150 nm であり、層間絶縁の SiO_2 の厚さは 300 nm である。比較のために、Nb 配線を施したデバイスも作製した。

図5に各デバイスを液体ヘリウム中(4.2 K)で測定した結果を示す。(a)は SIS 接合および配線層が Nb のデバイスの I - V 特性である。ここで、SIS 接合の $J_c R_N A (= I_c R_N)$ 積が、超伝導材料が同じであればほぼ一定値であることを利用して、電流に正常抵抗 R_N を乗じて電流を正規化した。ここで J_c は SIS 接合の臨界電流密度、 A は面積、 I_c は臨界電流である。上部電極が薄い(50 nm)デバイスと厚い(200 nm)デバイスの J_c は、それぞれ 25 kA/cm^2 と 15 kA/cm^2 であり、通常の 10 kA/cm^2 より十分高い。配線層が Nb の場合には上部電極の厚さによらず、ギャップ電圧として約

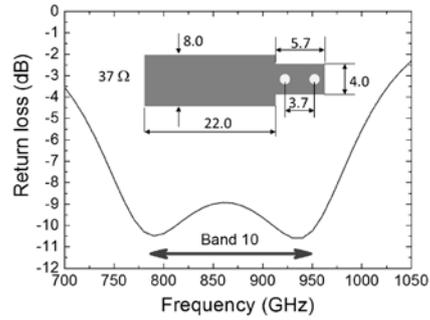


図6. 設計した全 NbTiN マイクロストリップ線路を用いた同調回路の反射特性。

2.8 mV が得られている。ただし、面積の大きい SIS 接合では、若干のギャップ電圧の低下がみられる。

次に(b)は上部電極が薄く、NbTiN の配線層の I - V 特性である。前述と同様に電流を正規化している。接合面積の小さい(直径 1 μm)デバイスと大きい(直径 2 μm)デバイスの電流の立ち上がり電圧は約 2.7 mV であり、(a)より小さい。加えて、接合面積の大きいデバイスはギャップ電圧において後方屈曲となっており、準粒子が Nb 電極に閉じ込められたことによる加熱効果が観測された。

最後に(c)は、上部電極を厚くし、NbTiN 配線層を用いたデバイスの I - V 特性である。ギャップ電圧は 2.73 mV と(a)より若干低いものの、ギャップ電圧での後方屈曲が観測されず、加熱効果を抑圧できていることが確認された。

(3) NbTiN/ SiO_2 /NbTiN マイクロストリップ線路を用いた同調回路設計

前述のような高 J_c の Nb 接合を用いることを想定し、高周波回路設計のために必要な SIS 接合の静電容量を求めるために、新たに極低温プローバによる S パラメータ測定法を開発した。SIS 接合の高周波インピーダンスの周波数依存性を測定することで、高精度な接合容量の測定を可能にしたもので、20 kA/cm^2 の Nb/Al $_x$ /Nb 接合に対して 100 $\text{fF}/\mu\text{m}^2$ が得られた。図6に設計した同調回路と導波管プローブインピーダンス (37 Ω) から見た反射特性を示す。回路設計には、実験的に得られた NbTiN の複素導電率などの知見が反映されている。その結果、ALMA Band 10 の周波数帯である 787-950 GHz 帯で低雑音動作可能な設計解を得た。これまでより 1.4 倍程度の感度向上が期待できる。

(4) デバイス作製と評価

i 線ステップを用いて SIS ミキサデバイスを作製した。接合の大きさは直径 1.1 μm である。ドライエッチングにより SIS 接合部(3層)の形成を行う際、接合上部のフォトリジストの耐エッチング特性から、接合全体の厚さは最大 280 nm に制限された。これにより SIS 接合の上部と下部電極の厚さを 140 nm と

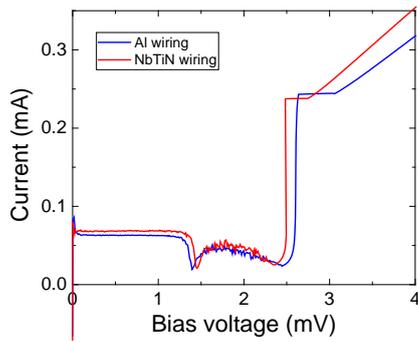


図 7. 試作した全 NbTiN 同調回路の SIS ミキサと従来の Al を用いた SIS ミキサの I-V 特性。

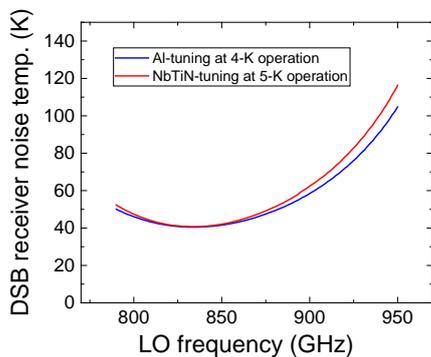


図 8. 雑音温度特性の比較。

した。この Nb 接合（臨界電流密度 20 kA/cm^2 ）を用いて、今回提案している NbTiN/SiO₂/NbTiN 伝送線路と従来の NbTiN/SiO₂/Al 伝送線路を持つデバイスを作製し、I-V特性を比較した（図 7）。従来のデバイスの Nb 接合のギャップ電圧が約 2.6 mV に対し、全 NbTiN 伝送線路のデバイスの Nb 接合のそれは約 2.5 mV であった。後者の接合の等価温度は約 5 K と推定され、140 nm 厚の Nb 電極では準粒子抑制効果が十分でないことが判明した。この条件で、受信機雑音温度のテラヘルツ帯周波数特性の理論計算を実施した。すなわち、Nb 接合の物理温度が 5 K で NbTiN/SiO₂/NbTiN 伝送線路を用いた場合と、Nb 接合が 4.2 K で従来の NbTiN/SiO₂/Al 伝送線路を用いた場合の理論的な受信機雑音温度特性の比較である。その結果、図 8 に示すように、ほぼ同等の受信機雑音特性が得られることが判明したが、実際のミキサ動作では、局部発振波を入力する必要があるため、さらに I-V特性が劣化する。今後に課題を残しているものの、新たな接合形成プロセスの開発によって SIS 接合の Nb 電極を厚くすることが可能であれば電極中の過剰準粒子効果を抑制できることを明らかにし、我々の全 NbTiN 同調回路によってテラヘルツ帯超低雑音受信機の実現可能性を示した。

5. 主な発表論文等 〔雑誌論文〕（計 5 件）

1. Y. Uzawa, M. Kroug, T. Kojima, K. Makise, A. Gonzalez, S. Saito, Y. Fujii, K. Kaneko, H. Terai, and Z. Wang, Design of Terahertz SIS Mixers Using Nb/AlN/Nb Junctions Integrated with All-NbTiN Tuning Circuits, IEEE Trans. Appl. Supercond., 査読有, vol. 27, 2017, pp. 1500705, DOI: 10.1109/TASC.2016.2632628.
2. T. Kojima, M. Kroug, K. Sato, T. Sakai, and Y. Uzawa, On-Wafer Capacitance Measurement of Nb-Based SIS Junctions with a 4-K Probe, IEEE Trans. Appl. Supercond., 査読有, vol. 27, 2017, pp. 9000704, DOI: 10.1109/TASC.2017.2657693
3. M. Ikeya, T. Noguchi, T. Kojima, and T. Sakai, Low Leakage Current Nb-based Tunnel Junctions with an Extra Top Al Layer, IEICE Trans. Electron., 査読有, vol. E100-C, 2017, pp. 291-297, DOI: 10.1578/transele.E100.C.291
4. Y. Uzawa, K. Makise, T. Kojima, M. Kroug, S. Saito, Y. Fujii, A. Gonzalez, K. Kaneko, H. Terai, and Z. Wang, Characterization of NbTiN films for superconducting terahertz circuitry, IEEE 15th International Superconductive Electronics Conference (ISEC), 査読有, 2015, pp. MF-P11, DOI: 10.1109/ISEC.2015.7383432
5. Y. Uzawa, Y. Fujii, A. Gonzalez, K. Kaneko, M. Kroug, T. Kojima, A. Miyachi, K. Makise, S. Saito, H. Terai, and Z. Wang, Tuning circuit material for mass-produced Terahertz SIS receivers, IEEE Trans. Appl. Supercond., 査読有, vol. 25, 2015, pp. 2401005, DOI: 10.1109/TASC.2014.2386211

〔学会発表〕（計 11 件）

1. Y. Uzawa, Y. Fujii, M. Kroug, K. Makise, A. Gonzalez, K. Kaneko, T. Kojima, A. Miyachi, S. Saito, H. Terai, and Z. Wang, Development of Superconducting THz Receivers for Radio Astronomy, 41st International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (招待講演), 2016 年 9 月 25-30 日, Bella center, Copenhagen, Denmark.
2. 小嶋崇文, Matthias Kroug, 酒井剛, 鶴澤佳徳, 冷却プローブステーションを用いた SIS 接合のキャパシタンス評価, 2016 年第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 2016 年 9 月 13-16 日, 朱鷺メッセ (新潟県新潟市)
3. Y. Uzawa, M. Kroug, T. Kojima, K. Makise, A. Gonzalez, S. Saito, Y. Fujii, K. Kaneko, H. Terai, and Z. Wang,

- Development of Terahertz SIS Mixers Using Nb/AlN/Nb Tunnel Junctions Integrated with All-NbTiN Tuning Circuits, Applied Superconductivity Conference 2016, 2016年9月4-9日, Colorado Convention Center, Denver, USA.
4. T. Kojima, M. Kroug, K. Sato, T. Sakai, and Y. Uzawa, On-Wafer Capacitance Measurement of Nb-Based SIS Junctions With a 4-K Probe Station, Applied Superconductivity Conference 2016, 2016年9月4-9日, Colorado Convention Center, Denver, USA.
 5. Y. Uzawa, K. Makise, S. Saito, H. Terai, Z. Wang, T. Kojima, M. Kroug, Y. Fujii, A. Gonzalez, and K. Kaneko, Development of Highly Sensitive Superconducting Receivers for ALMA Band 10 and Future Prospects, 2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (招待講演), 2016年8月21-25日, Grand Hilton Seoul Hotel, Seoul, Korea.
 6. Y. Uzawa, M. Kroug, T. Kojima, K. Makise, A. Gonzalez, S. Saito, Y. Fujii, K. Kaneko, H. Terai, and Z. Wang, Development of Terahertz SIS Mixers Using Nb/AlN/Nb Tunnel Junctions Integrated with All-NbTiN Tuning Circuits, 27th International Symposium on Space Terahertz Technology, 2016年4月12-15日, Jinling Hotel, Nanjing, China.
 7. Y. Uzawa, Terahertz radio astronomy applications and activities at NICT, Spain-Japan Joint workshop on Millimetre-wave and Terahertz (招待講演), 2016年3月17-18日, Universidad Carlos III de Madrid, Spain.
 8. Y. Uzawa, K. Makise, T. Kojima, M. Kroug, S. Saito, Y. Fujii, A. Gonzalez, K. Kaneko, H. Terai, and Z. Wang, Characterization of NbTiN films for superconducting terahertz circuitry, The 15th International Superconductive Electronics Conference, 2015年7月6-9日, Nagoya University and Nogakudo, Nagoya, Japan.
 9. Y. Uzawa, K. Makise, T. Kojima, S. Saito, Y. Fujii, A. Gonzalez, K. Kaneko, H. Terai, and Z. Wang, Characterization of NbTiN films for superconducting terahertz circuitry, 15th Workshop on Submillimeter-Wave Receiver Technologies in Eastern Asia, 2014年12月15-17日, Hotel Kintetsu Aquavilla Ise-Shima, Mie, Japan.
 10. Y. Uzawa, Y. Fujii, M. Kroug, K. Makise, T. Kojima, A. Miyachi, A. Gonzalez, K. Kaneko, S. Saito, H. Terai, Z. Wang,

and S. Asayama, Performance of Terahertz Superconducting Receivers for the ALMA Telescope, The 9th International Symposium on Intrinsic Josephson Effect and THz Plasma Oscillations in High-Tc Superconductors (招待講演), 2014年11月30日-12月3日, Kyoto University, Kyoto, Japan.

11. Y. Uzawa, Y. Fujii, A. Gonzalez, K. Kaneko, M. Kroug, T. Kojima, A. Miyachi, K. Makise, H. Terai, Z. Wang, and S. Asayama, Performance of mass-produced terahertz SIS receivers for the ALMA telescope, Applied Superconductivity Conference 2014, 2014年8月10-15日, Charlotte Convention Center, Charlotte, USA.

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1件)

名称: テラヘルツ波イメージング装置
発明者: 鶴澤佳徳、木内等、小嶋崇文、川瀬晃道
権利者: 同上
種類: 特許
番号: 特願 2016-048305
出願年月日: 2016年3月11日
国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0件)

[その他]
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鶴澤 佳徳 (UZAWA Yoshinori)
国立研究開発法人情報通信研究機構・ソーシャルイノベーションユニットテラヘルツ研究センターテラヘルツ連携研究室・室長
研究者番号: 00359093

(2) 研究分担者

小嶋 崇文 (KOJIMA Takafumi)
国立天文台・先端技術センター・助教
研究者番号: 00617417

(3) 連携研究者

牧瀬 圭正 (MAKISE Kazumasa)
国立研究開発法人情報通信研究機構・未来ICT研究所フロンティア創造総合研究室・主任研究技術員
研究者番号: 60363321