

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420305

研究課題名(和文) テラヘルツ帯受信機の極高感度化を狙った低雑音超伝導パラメトリック増幅器の開発

研究課題名(英文) Study of low-noise superconducting parametric amplifier aiming at sensitivity enhancement of terahertz receivers

研究代表者

武田 正典 (Takeda, Masanori)

静岡大学・工学部・講師

研究者番号：80470061

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：超伝導伝送線路におけるカイネティックインダクタンスの電流非線形性を利用する超伝導パラメトリック増幅器(KIT増幅器)に関する研究を実施した。NbTiN薄膜コプレーナ線路(CPW)を作製し、ストリップに直流電流を印加した場合のインダクタンス変化をマイクロ波帯で測定した。測定結果と理論計算は概ね一致し、ストリップの細線化により強い非線形性が得られることが分かった。マイクロ波帯での実験結果を基に、0.3 THz帯でのKIT増幅器の設計を行った。ストリップ幅2 μm 、線路長5 cmのNbTiN-CPWに0.2 mWのポンプ波電力を印加することで、10 dB以上のパラメトリック増幅が期待できる。

研究成果の概要(英文)：We studied superconducting parametric amplifiers (KIT amplifiers) which use a kinetic-inductance nonlinearity of superconducting transmission line to applied current. We fabricated a NbTiN-thin-film coplanar waveguide (CPW), and measured a variation of the kinetic inductance in the microwave region when the DC current was applied to the strip. The measurement results were in good agreement with calculation results, and it was found that the strong nonlinearity is obtained in the CPW with narrow strip width. Based on the results, we designed the KIT amplifier at 0.3 THz. Using a NbTiN-CPW with the strip width of 2 μm and the length of 5 cm, the parametric gain more than 10 dB is expected by applying a pumping power of 0.2 mW.

研究分野：超伝導エレクトロニクス

キーワード：カイネティックインダクタンス パラメトリック増幅 コプレーナ線路 窒化ニオブチタン

1. 研究開始当初の背景

電波と光波の中間領域に位置するテラヘルツ波(周波数 0.3-10 THz)は、(1) 超高周波、(2) 可視域で不透明な物質に対する透過性などの特徴を有しており、その周波数領域には(3) 生体物質や有機物など多くの物質の指紋スペクトルが存在している。このような特徴を活かし、超高速テラヘルツ無線通信、医療診断、セキュリティ応用、分光研究や電波天文観測など多岐の分野にわたりテラヘルツ波利用が検討されている。

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、フェムト秒レーザを用いたテラヘルツパルス波の発生・検出技術の進展により急速に発展を遂げている。特に時間領域分光法に代表されるように、高い信号強度のパルス波によって信号対雑音(S/N)比を上げ、容易にテラヘルツ広帯域分光を行える状況を作り出した。一方、テラヘルツ無線通信やポディスキャナのようなセキュリティ応用、また電波天文観測などの分野では連続波(CW)を計測する技術が必須である。特に増幅器は、発振器出力や検出システムの感度を向上させ、計測における S/N 比を飛躍的に改善するために重要なキーデバイスである。マイクロ波帯や光領域には既に高性能増幅器が存在し、自由自在に検出強度を操ることで様々な研究・応用が展開されてきた。しかし、テラヘルツ帯では、発振器や検出器開発は盛んに行われているものの、増幅器技術は未だ発展途上である。現在、ミリ波帯で使用されている高電子移動度トランジスタ(HEMT)の高周波化が進んでいるが、テラヘルツ帯において低雑音・高利得性能を有する HEMT を実現するためには極微細加工を必要とし、極めて作製が困難である。他の周波数領域と同様、低雑音増幅器が実現できればテラヘルツ応用分野への波及効果は極めて大きい。

2. 研究の目的

近年、超伝導窒化ニオブチタン(NbTiN)薄膜コプレーナ線路を用いた進行波型超伝導カイネティックインダクタンス増幅器(Kinetic Inductance Traveling amplifier: KIT 増幅器)が提案され、マイクロ波帯で極めて優れた低雑音性能及び1オクターブにわたる広帯域性能を示すことが実証された。KIT 増幅器は超伝導伝送線路におけるカイネティックインダクタンスがポンプ波電流によって非線形に変化することを利用するパラメトリック増幅器である。

超伝導伝送線路に電流を印加した場合、単位波長あたりのカイネティックインダクタンスの変化率は通常小さく、マイクロ波帯で KIT 増幅器を高利得動作させるためには 1 m 程度の長い線路を必要とする。一方、動作周波数の増大に伴い実効波長が短くなり、テラヘルツ帯ではデバイスプロセスに適した線路長になることを見込んでいる。また KIT 増

幅器は、原理的に超伝導ギャップ周波数まで動作可能である。そこで、トランジスタ系増幅器のようにナノメートルサイズの極微細加工を必要とせず作製可能な KIT 増幅器のテラヘルツ動作を目指し、増幅器に用いる超伝導材料の検討や物性評価及び設計技術を確立することを研究目的とする。

3. 研究の方法

本研究は、超伝導伝送線路におけるカイネティックインダクタンスの非線形効果を利用する KIT 増幅器に関するものであり、テラヘルツ帯低雑音増幅器の実現を目指すものである。本研究課題を進めるにあたり、測定が容易なマイクロ波帯において、また作製技術を確立している窒化ニオブチタン(NbTiN)薄膜を用いてカイネティックインダクタンスの電流非線形性の評価を行い、KIT 増幅器開発の基盤技術を構築する。具体的には、増幅器性能シミュレーションに必要な臨界電流密度及び超伝導ギャップエネルギーの測定を行い、設計技術を確立する。また、超伝導コプレーナ線路におけるカイネティックインダクタンスの電流非線形性を測定し、線路寸法の最適化を行う。さらに、増幅器利得評価に向けテラヘルツ帯における KIT 増幅器の設計及び作製を行う。

また、KIT 増幅器の高温動作を目指し、高い超伝導転位温度を有する高温超伝導体薄膜の作製技術の確立を目指す。レーザアブレーション法による YBCO 薄膜作製を試み、レーザパワー、酸素圧力、作製時の基板温度などの最適化を行い、高品質化のための作製条件を見出す。

4. 研究成果

(1) NbTiN 薄膜の超伝導特性評価

増幅器設計を行うにあたり、実際の超伝導パラメータを用いて利得のシミュレーションを行うため、超伝導 NbTiN 薄膜の磁場侵入長及び超伝導ギャップエネルギー測定について実施した。

NbTiN 薄膜の作製

NbTiN 薄膜は、アルゴン(Ar)と窒素(N₂)の混合ガスを用いて反応性 DC マグネトロンスパッタにより作製した。作製に用いた 8 インチ NbTi ターゲットの組成比は、質量比において 100:20 (Nb:Ti)である。Ar 及び N₂ ガスの流量をそれぞれ 100 sccm 及び 36 sccm に設定し、圧力 2 mTorr の下で単結晶(100)MgO 基板上に作製した。

磁場侵入長の電流依存性の評価

磁場侵入長の電流依存性を評価するため、4 端子抵抗率測定パターンを作製して NbTiN 薄膜の直流抵抗率を測定した。測定パターンの寸法は、長さ 15 μm、幅 0.5 μm 及び厚さ 32 nm である。抵抗率測定はバイアス電流を 5 μA から 300 μA まで、また温度を 20 K から 4 K まで変化させて行った。図 1 に抵抗率 - 温度特性を示す。バイアス電流を変えること

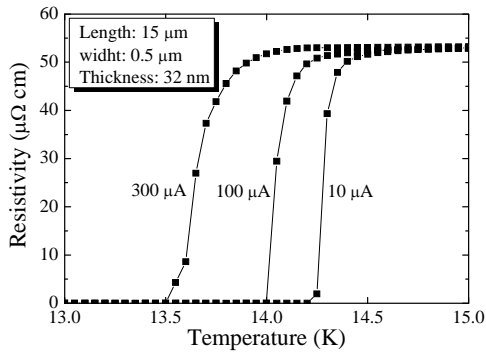


図 1 異なるバイアス電流で測定した NbTiN 薄膜の抵抗率 - 温度特性 .

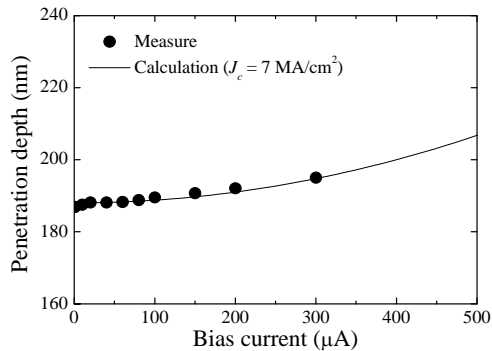


図 2 NbTiN 薄膜における磁場侵入長の電流依存性 .

で、超伝導転位温度の明瞭な変化が観察された。20 K における抵抗率はバイアス電流に関わらず 54 $\mu\Omega\text{cm}$ 程度であった。超伝導転位温度及び 20 K 抵抗率から求めた磁場侵入長の電流依存性を図 2 に示す。磁場侵入長を計算する際に使用した超伝導ギャップの値は、同程度の膜厚の NbTiN 薄膜のテラヘルツ時間領域分光測定で得られた結果（詳細は次項で述べる）を用いた。磁場侵入長は電流値とともに増大しており、本薄膜を用いて作製するコプレーナ線路においてカイネティックインダクタンスが印加電流によって非線形的に変化することが期待できる。また、測定結果をギンツブルグ - ランダウ理論による磁場侵入長の計算結果でフィッティングすることにより、作製した薄膜の臨界電流密度は 7 MA/cm^2 と見積もっている。

超伝導ギャップエネルギーの測定

KIT 増幅器の動作上限周波数は薄膜の超伝導ギャップ周波数までであり、その周波数よりも十分小さい周波数領域で低雑音・高利得動作が可能である。ここでは、MgO 基板上的 NbTiN 薄膜の超伝導ギャップ周波数をテラヘルツ時間領域分光法 (THz-TDS) により測定した結果について述べる。

波長 780 nm のファイバーレーザ及び光伝導アンテナから構成される THz-TDS 装置を用いて、0.1 - 4.5 THz の周波数領域にわたり周波数分解能 48.8 GHz で NbTiN 薄膜の透過分光測定を行った。NbTiN 薄膜はヘリウムガス

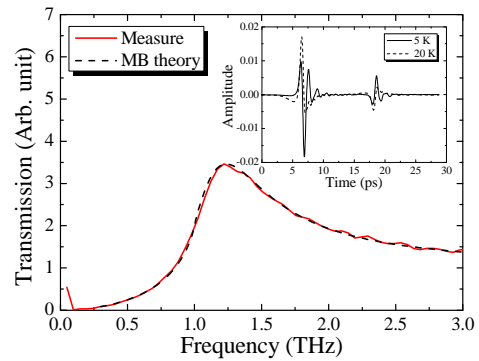


図 3 THz-TDS による透過スペクトルの測定値 (実線) 及び計算値 (破線). 内挿図はフーリエ変換前のパルス波形 .

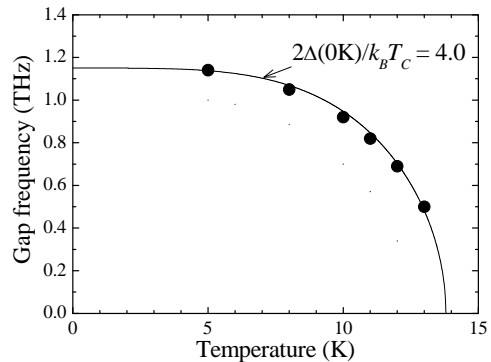


図 4 NbTiN 薄膜の超伝導ギャップ .

によって 5 K まで冷却可能であり、20 K の常伝導状態をリファレンスとして超伝導状態の透過スペクトルを測定した。一例として、5 K 冷却時の透過スペクトルを図 3 に示す。内挿図は超伝導状態及び常伝導状態の THz パルス波形であり、これらをフーリエ変換して透過スペクトルを求めている。一方、Mattis-Bardeen 理論による複素導電率を用いて透過スペクトルを計算することができる。超伝導ギャップ周波数をフィッティングパラメータとして、計算値を測定値にフィッティングした。図 4 に NbTiN 薄膜の超伝導ギャップ周波数の温度依存性を示す。BCS 理論によるフィッティングから、4 K 冷却時の超伝導ギャップ周波数 f_g は 1.14 THz と評価している。測定した超伝導ギャップエネルギー及び 20 K における常伝導抵抗率から NbTiN 薄膜の固有の磁場侵入長は 186 nm と見積もっている。

(2) マイクロ波帯におけるカイネティックインダクタンスの電流依存性の測定

KIT 増幅器は、超伝導伝送線路におけるカイネティックインダクタンスの非線形性によりパラメトリック増幅が行われる。大きいカイネティックインダクタンスを有する超伝導コプレーナ線路 (CPW) を検討し、マイクロ波帯でカイネティックインダクタンス非線形性を測定した。

超伝導コプレーナ線路の検討

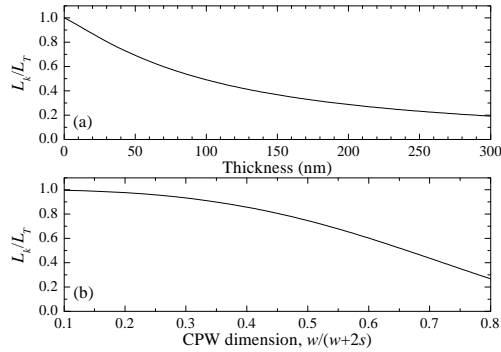


図5 カイネティックインダクタンスの (a)膜厚依存性, (b)線路寸法依存性.

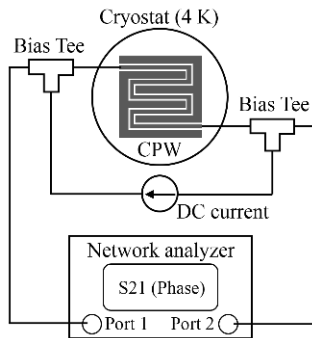


図6 マイクロ波帯におけるカイネティックインダクタンス非線形性評価測定系.

カイネティックインダクタンスの電流非線形性を強めるためには、超伝導 CPW 固有のインダクタンスを大きくする必要がある。そのため超伝導 CPW におけるカイネティックインダクタンスの線路寸法に対する依存性について検討した。カイネティックインダクタンスは TEM モード近似による等角写像法により計算した。図5に MgO 基板上の NbTiN 薄膜超伝導 CPW における(a)膜厚依存性及び(b)線路寸法依存性を示す。図5においてカイネティックインダクタンス L_k は全インダクタンス L_T で正規化している。また、 w は CPW ストリップ幅、 s は CPW ギャップである。図5(a), (b)より、膜厚を薄く、かつストリップ幅を小さくすることで、カイネティックインダクタンスが支配的になることが分かる。

超伝導 CPW のカイネティックインダクタンスの電流非線形性評価

カイネティックインダクタンスの電流非線形性を測定するため、膜厚 40 nm、ストリップ幅 4 μm 、CPW ギャップ 2 μm 及び線路長 0.2 m の NbTiN 薄膜超伝導 CPW を作製した。ストリップ導体に電流が印加されカイネティックインダクタンスが変化すると、線路の電気長が変化する。そこで、作製した超伝導 CPW の透過係数 S_{21} の位相をベクトルネットワークアナライザで測定した。測定系を図6に示す。作製した超伝導 CPW は筐体を実装

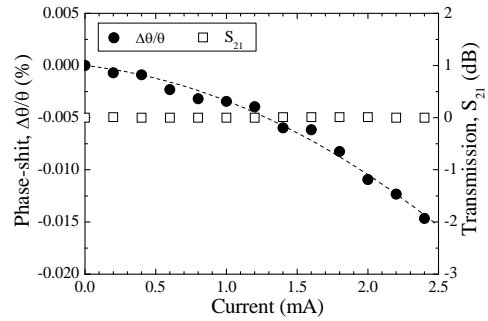


図7 周波数 5 GHz における NbTiN 薄膜超伝導 CPW の電流印加時の電気長変化及び伝送損失.

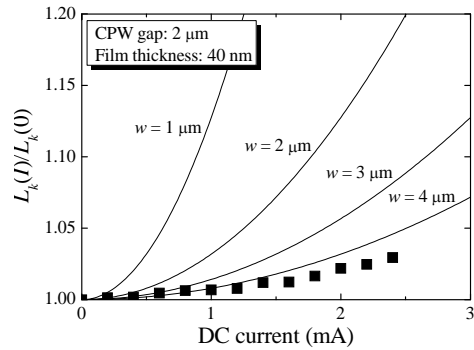


図8 電気長測定から算出したカイネティックインダクタンスの電流依存性 () 及び理論計算 (実線).

し、機械式冷凍機で 4 K まで冷却している。電流はバイアスティを通じてストリップ導体に供給した。また、図6の測定系において、電流を印加していない場合の値が基準値になるようベクトルネットワークアナライザを校正した。

図7に電流印加時の電気長の変化量及び S_{21} の振幅を測定した結果を示す。測定周波数は 5 GHz である。電気長の変化量 $\Delta\theta$ は、電流を印加していない場合の電気長 θ で正規化している。また各点は 5 回の測定の平均値である。図7から、線路に電流を印加した場合、伝送損失を伴わず電気長が変化していることを確認した。

電気長の測定結果からカイネティックインダクタンスを算出した結果を図8に示す。また、(1)で見積もった臨界電流密度 7 MA/cm^2 を仮定して理論計算から求めた結果も示す。実験結果は概ね計算結果と一致している。

(3) テラヘルツ帯 KIT 増幅器の設計

マイクロ波帯における超伝導 CPW のカイネティックインダクタンスの電流非線形性の結果を基に、0.3 THz 帯 KIT 増幅器の設計を行った。KIT 増幅器の利得計算は縮退 4 波混合理論を用いて行った。膜厚 40 nm、線路長の 5 cm の NbTiN 薄膜超伝導 CPW を有する KIT 増幅器利得を図9に示す。ストリップ幅

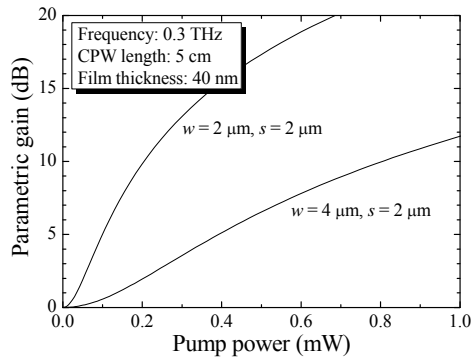


図9 周波数 0.3 THz における KIT 増幅器の利得の計算結果。

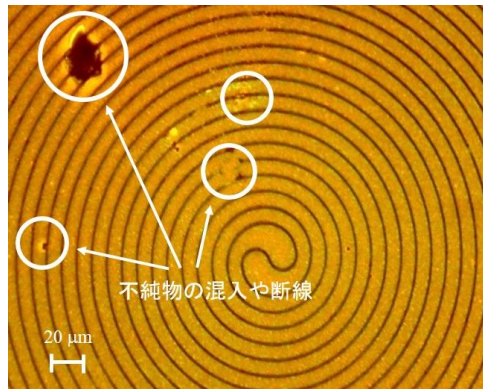


図10 デバイス作製時の欠陥例

4 μm のものでは、利得 10 dB を達成するために 1 mW 程度のポンプ波電力を必要とする。図 8 からストリップ幅の細線化により、同じポンプ波電流でも強いカイネティックインダクタンス非線形性が見込まれるため、ストリップ幅 2 μm の CPW を用いることにした。この場合、ポンプ波電力 0.2 mW 程度で利得 10 dB 以上が期待でき、既存の THz 光源で十分駆動可能である。

現在、KIT 増幅器の試作を行っている。しかし、デバイス作製において歩留まりが悪く増幅器利得の評価には至っていない。その主な原因は、基板全面にわたる非常に長いスパイラル状かつ細線の線路のため、成膜時における膜中への不純物混入、レジスト塗布時の不純物、またオーバーエッチングによるストリップの窪みや断線であった(図 10)。今後、作製プロセスを改善するとともに歩留まりを向上し、KIT 増幅器の利得評価を行なう。

KIT 増幅器の高温動作へ向け、レーザーアブレーション法による YBCO 薄膜作製を行ってきた。現在、膜厚 200 nm、線幅 6 μm 、線路長 1 cm の細線で転位温度 85 K の薄膜が実現できているが、KIT 増幅器応用のために今後さらに薄膜化、細線化を目指しプロセスの改善を行っていく。

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)

T. Goto, M. Takeda, S. Saito, and H. Shimakage, “Calculation of superconducting parametric amplifier performances”, Journal of Physics: Conference Series, 印刷中, (2017), 査読有

M. Takeda, T. Kojima, A. Saito, K. Makise, and H. Shimakage, “Evaluation of kinetic-inductance nonlinearity in a single-crystal NbTiN-based coplanar waveguide”, JJAP Conference Proceedings, Vol. 4, 011502, (2016), 査読有

武田正典, 小嶋崇文, 牧瀬圭正, 齊藤敦, 齋藤伸吾, 島影尚, 「進行波型カイネティックインダクタンス増幅器開発に向けた超伝導材料の検討」, 日本赤外線学会誌, 24 巻 2 号, pp. 50-55, (2015), 査読有

武田正典, 小嶋崇文, 齊藤敦, 牧瀬圭正, 鶴澤佳徳, 齋藤伸吾, 島影尚, 「単結晶窒化ニオブチタン薄膜コプレーナ線路におけるカイネティックインダクタンス非線形性の評価」, 信学技法, 114 巻, pp. 7-12, (2015), 査読無

〔学会発表〕(計 12 件)

前田瞳, 武田正典, 牧瀬圭正, 小嶋崇文, 島影尚, 寺井弘高, 「窒化ニオブチタン薄膜における磁場侵入長の電流依存性」, 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(神奈川県横浜市)

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ネ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, 2017 年 3 月 15 日, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)

T. Goto, M. Takeda, S. Saito, and H. Shimakage, “Calculation of superconducting parametric amplifier performances”, International Symposium on Superconductivity, 2016 年 12 月 15 日, 東京国際フォーラム(東京都千代田区)

後藤隆志, 木村寛太, 島影尚, 武田正典, 「YBCO 薄膜を用いたパラメトリック増幅器の検討」, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演, 2016 年 9 月 14 日, 朱鷺メッセ(新潟県新潟市)

武田正典, 小嶋崇文, 齊藤敦, 鶴澤佳徳, 島影尚, 「単結晶窒化ニオブチタン薄膜コプレーナ線路のカイネティックインダクタンス非線形性の評価」, 第 25 回日本赤外線学会研究発表会, 2015 年 10 月 22 日, 中部大学(愛知県春日井市)

M. Takeda, T. Kojima, A. Saito, K. Makise, and H. Shimakage, “Evaluation of kinetic-inductance nonlinearity in a

single-crystal NbTiN-based coplanar waveguide”, Inter-Academia 2015, 2015 年 9 月 29 日, 浜松アクトシティ(静岡県浜松市)

川上彰, 堀川隼世, 兵頭政春, 田中秀吉, 武田正典, 島影尚, 「中赤外マイクロストリップ線路の位相定数」, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 2015 年 3 月 13 日, 東海大学(神奈川県平塚市)

武田正典, 小嶋崇文, 齊藤敦, 牧瀬圭正, 鶴澤佳徳, 齋藤伸吾, 島影尚, 「単結晶 NbTiN 薄膜の超伝導カイネティックインダクタンス非線形性」, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 2015 年 3 月 12 日, 東海大学(神奈川県平塚市)

武田正典, 小嶋崇文, 齊藤敦, 牧瀬圭正, 鶴澤佳徳, 島影尚, 「単結晶窒化ニオブチタン薄膜コプレーナ線路におけるカイネティックインダクタンス非線形性の評価」, 超伝導エレクトロニクス研究会, 2015 年 1 月 22 日, 機械振興会館(東京都港区)

堀川隼世, 川上彰, 兵頭政春, 田中秀吉, 武田正典, 島影尚, 「ナノダイポールアンテナを用いた超伝導中赤外光検出器の検討」, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 2014 年 9 月 20 日, 北海道大学(北海道札幌市)

岩本恵佑, 島影尚, 川上彰, 齊藤敦, 武田正典, 「CeO₂ バッファ層を用いた MOD 法による高品質 Bi-2212 薄膜の作製」, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 2014 年 9 月 19 日, 北海道大学(北海道札幌市)

武田正典, 小嶋崇文, 齊藤敦, 牧瀬圭正, 島影尚, 「進行波型超伝導パラメトリック増幅器開発に向けたカイネティックインダクタンス非線形性の検討」, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 2014 年 9 月 18 日, 北海道大学(北海道札幌市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

- 出願状況(計 0 件)
- 取得状況(計 0 件)

6. 研究組織

(1)研究代表者

武田 正典 (TAKEDA, MASANORI)
静岡大学・工学部・講師
研究者番号: 80470061

(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

島影 尚 (SHIMAKAGE, HISASHI)

茨城大学・工学部・教授

研究者番号: 80359091

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 研究所ナノ ICT 研究室・

専門推進員

研究者番号: 60363321