

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18360177

研究課題名(和文) 超伝導トンネル接合を用いたマイクロ波、ミリ波雑音源の開発

研究課題名(英文) Development of a noise source at micro- and millimeter-wave band using a superconducting tunnel junction

研究代表者

野口 卓 (NOGUCHI TAKASHI)

国立天文台・先端技術センター・准教授

研究者番号：90237826

研究成果の概要：超伝導トンネル接合におけるリーク電流の低減に関する理論的、実験的な研究を行い、リーク電流が著しく小さく、ギャップ電圧で急激な電流の立ち上がりを示す、ほぼ理想的な超伝導トンネル接合素子を再現良く製作できる技術を確立できた。こうして得られた超伝導トンネル接合素子を使用した雑音源回路モジュールを開発し、マイクロ波帯雑音源としての動作の実証に成功した。また、この雑音源を用いて、冷却低雑音アンプの雑音温度を測定し、半導体ダイオードを用いた雑音源との比較を行ったところ、超伝導トンネル接合素子からほぼ理論通りの雑音出力が得られることが明らかになった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	8,400,000	0	8,400,000
2007年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2008年度	2,300,000	690,000	2,990,000
年度			
年度			
総計	12,800,000	1,320,000	14,120,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：超伝導材料・素子、マイクロ波・ミリ波、電子デバイス・機器、雑音源

1. 研究開始当初の背景

現在一般的に行われている市販の雑音指数計(NFメータ)と冷却減衰器(アッテネータ)を組み合わせた雑音指数の測定方法では、測定系固有の誤差が冷却増幅器の性能向上、すなわち雑音指数の低下とともに相対的に増大し、雑音指数の正確な測定が困難になりつつあ、測定精度の高い新たな雑音指数測定技術の開発が必要となってきている。

2. 研究の目的

超伝導トンネル接合を雑音源として利用した新方式の雑音指数計の開発を目標として、

超伝導トンネル接合デバイスが非常に精度の高い雑音指数の測定を可能にする雑音源として利用できることを実証する。

3. 研究の方法

超伝導トンネル接合(SIS接合)の雑音出力が接合に印加する電圧に比例することを利用して、電圧制御型のマイクロ波雑音源を開発する。

(1)理想的な電流電圧特性を有する高品質のNb/AlO_x/Nb型SIS接合素子の製作技術を開発する。ギャップ電圧以下のサブギャップ領域でのリーク電流の起源に関する理論的検討を行い、その結果をもとに、サブギャップ領

域でのリーク電流の低減に関する実験的検討を行う。

(2) こうして得られた高品質 SIS 素子を用いて、マイクロ波帯雑音源を試作する。その雑音発生器としての性能評価を行い、高性能の電圧制御型マイクロ波雑音源とし動作することを実証する。

4. 研究成果

(1) 高品質 Nb/AlO_x/Nb 型 SIS 接合素子
ギャップ電圧以下のいわゆるサブギャップ領域における SIS 接合を流れる電流は、BCS 理論の予測よりも大きな値となることが知られている。従来、この SIS 接合の過剰なサブギャップ電流は、主に、トンネルバリアの欠陥などを通じたリーク電流に起因するものと考えられてきた。そのため、サブギャップ領域でリーク電流の少ない高品質の SIS 接合を実現するために、欠陥の少ないトンネルバリアの製作に多くの努力が払われてきた。しかし、現在のところ、過剰なサブギャップ電流の大幅な改善は実現できていない。

ところで、SIS 接合のトンネル電流は両側の超伝導体の状態密度に依存することが知られており、その電流-電圧特性は超伝導電極の状態密度のエネルギー依存性を反映したものとなる。この観点から SIS 接合の電流-電圧特性を見直してみると、電極の超伝導体のエネルギーギャップ端の内側に準粒子状態が存在し、これらの状態を通じた準粒子遷移によるトンネル電流が存在することを示唆しているものと考えられる。ここで注目したいのは、SIS 接合のサブギャップ電流はトンネルバリアの特性だけでなく、電極である超伝導体の特性にも関連していることである。そこで、本研究では、Nb/Al·AlO_x/Nb SIS 接合において、電極 Nb の超伝導特性、特に、超伝導エネルギーギャップ内の有限の状態密度の広がり(ブロードニング)に着目して準粒子トンネル電流の解析を行い、高品質の Nb/Al·AlO_x/Nb SIS 接合素子を実現する方法を理論的に検討した。

超伝導エネルギーギャップの広がりの効果は、超伝導ギャップエネルギー Δ に虚数部(ブロードニングファクタと呼ぶ)を導入し、 $\Delta = \Delta_1 - i\Delta_2$ という複素数として扱うことにする。一般に、SIS 接合のトンネル電流 I_T は次式で与えられる。

$$I_T = A \int N_r(E - eV) N_l(E) [f_r(E - eV) - f_l(E)] dE \quad (1)$$

ここで、 $N_{r,l}(E)$ および $f_{r,l}(E)$ は、それぞれ、超伝導電極の準粒子状態密度、フェルミ分布関数であり、

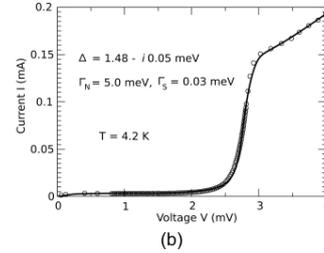
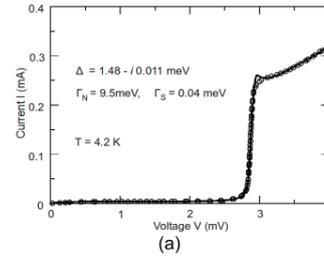


図1 (a)鋭いギャップ構造と(b)丸まったギャップ構造を示す Nb/Al·AlO_x/Nb SIS 接合の電流-電圧特性。

$$N_{r,l}(E) = \Re \left[\frac{E}{\sqrt{E^2 - \Delta_{r,l}^2}} \right] \quad (2)$$

および

$$f_{r,l}(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E}{k_B T}\right) + 1} \quad (3)$$

で定義される。(1)-(3)式を用いて、複素数に拡張したギャップエネルギー $\Delta_{r,l} = \Delta_1 - i\Delta_2$ に対して、トンネル電流 I_T を求めることができる。図1(a)、(b)は、見かけ上の電流-電圧特性が大きく異なる2つの SIS 接合について、(1)-(3)式を用いてトンネル電流を求め、実験値とフィッティングした例である。図1に示した2例ともブロードニングファクタ Δ_2 を取り入れた計算値(実線)と測定値(白丸)が非常に良く一致し、ブロードニングファク

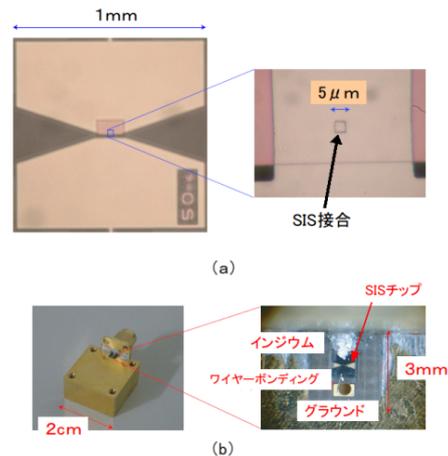


図2 (a) SIS 雑音源チップ(左)と SIS 接合付近の拡大写真(右)。(b) マイクロ波帯雑音源マウントモジュール(左)とマウントした SIS 雑音源チップ付近の拡大図(右)。

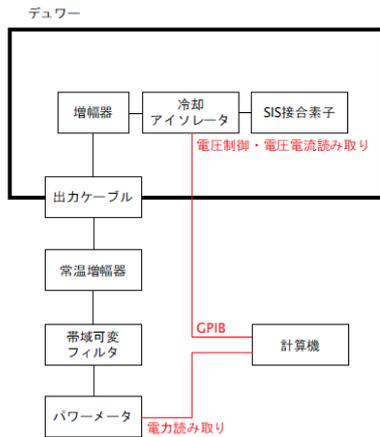


図3 SIS 雑音源の基本特性の測定ブロックダイアグラム。デュワー内の(冷却)増幅器の雑音特性は、あらかじめ半導体雑音源を用いて測定し、参照値とした。

タ Δ_2 の増加によってギャップ電圧での電流の立上りが鈍り、丸まったものとなることがわかる。これらの結果は、良好な電流-電圧特性を示すNb/Al \cdot AlO $_x$ /Nb SIS 接合を実現し、さらに改善するためには、ブロードニングファクタ Δ_2 を小さくすることが重要であることを示している。ブロードニングファクタ Δ_2 は超伝導 Nb 薄膜の品質を表すパラメータと考えられるので、ギャップ電圧付近でのリーク電流を小さく抑えるためには、Nb 薄膜の高品質化が不可欠であることが明らかになった。

(2) マイクロ波雑音源の開発

前節の理論的予測をもとに、Nb/Al \cdot AlO $_x$ /Nb 構造の SIS 接合素子の製作およびその高品質化に関する実験的な検討を行った。種々の条件で Nb 薄膜とこれを用いた SIS 素子の試作実験を行った結果、9.0 K 以上の超伝導転移温度を有する高品質の Nb 薄膜は、0.7 GPa 程度の圧縮応力と 20 $\mu\Omega$ cm 以下の比抵抗を有することが明らかになった。さらに、このような高品質の Nb 薄膜を用いると、先の理論の予測通り、リーク電流が少なく、鋭いギャップ構造を示す高品質の SIS 接合が製作できることが明らかになった。こうして、マイクロ波雑音源に利用できる高品質な SIS 素子の製作が再現良く製作できるようになった。

以上のようにして得られた Nb/Al \cdot AlO $_x$ /Nb SIS 素子を雑音源回路モジュールに組み込み、0-20 GHz 帯で動作するマイクロ波帯雑音源としての動作実証を行った。図2に試作した SIS 雑音源チップとマイクロ波雑音源のマウントモジュールの外観写真を示す。

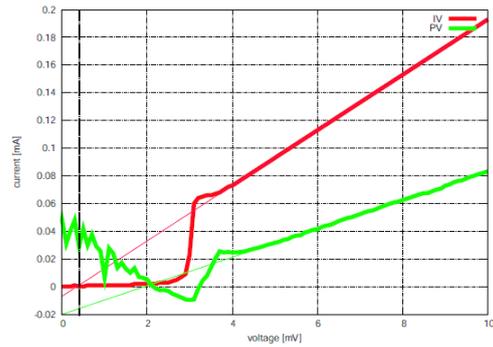


図4 SIS 素子の直流電流-電圧特性(赤太線)と出力雑音(4-8 GHz)の電圧依存性。理論の予測通り、SIS 素子の雑音出力は、4 mV 以上のバイアス領域では電圧に比例している。

この雑音源モジュールを用いて、図3に示すような構成で SIS 素子の雑音出力を測定した。デュワー内の冷却増幅器には、SIS ミキサの中間周波(IF)増幅に用いられている低雑音 HEMT 増幅器(帯域 4-8 GHz)を用いた。図4に雑音源の SIS 素子の電流-電圧特性(赤太線)と 4-8 GHz 帯の雑音出力(緑太線)の電圧依存性を示す。SIS 素子の常伝導抵抗は、外部回路との整合を考慮して 50 Ω として設計しており、実際にほぼ 50 Ω の常伝導抵抗を持つ SIS 素子が実現できている。また、図4の雑音出力の電圧依存性から明らかのように、4 mV 以上の電圧領域では、バイアス電圧に比例した雑音電力が SIS 素子から出力されることが明らかになった。

この実験結果は以下のように理論的に説明できる。超伝導トンネル接合に電圧 V_0 を印加し、接合に電流 I_0 を流すと、接合にはショット雑音と呼ばれる雑音電流が発生する。その雑音電流の大きさ(振幅) i_N は次式で与えられる。

$$\langle i_N^2 \rangle = 2eI_0B \coth\left(\frac{eV_0}{2k_B T}\right) \quad (4)$$

ここで、 e, k_B, B は、それぞれ素電荷、ボルツマン定数、(測定系の)バンド幅であり、 T は接合の動作温度である。超伝導トンネル接合の動作温度を $T = 4.2$ K(液体ヘリウム温度)とし、接合にかかるバイアス電圧 V_0 をギャップ電圧 V_G (約3 mV)以上とすると、(4)式は

$$\langle i_N^2 \rangle = 2eI_0B \quad (5)$$

と簡略化される。この超伝導トンネル接合に負荷 R_L を接続した場合を考える。さらに、負荷 R_L が超伝導トンネル接合の出力抵抗(R_S)と整合が取れた場合($R_L = R_S$)を考えると、負荷に取り出せる電力(有能電力) P_{AVS} は、

$$P_{AVS} = \left(\frac{i^2}{4} \right) R_S \quad (6)$$

$$= \frac{1}{2} e I_0 R_S B = \frac{1}{2} e V_0 B$$

で与えられる。ここで、ギャップ電圧 V_G 以上では、トンネル接合の電流電圧特性がオームの法則 ($V_0 = I_0 R_S$) に従って直線になることを利用した。(6)式は、超伝導トンネル接合にインピーダンス整合のとれた負荷を接続すると、バイアス電圧に比例した雑音電力が取り出せることを示している。この理論的予測は、図4に示した SIS 雑音源出力の電圧依存性と定性的に一致している。以上のことから、SIS 素子はバイアス電圧に比例する強度のマイクロ波帯の雑音を発生することが理論および実験的に確認できた。したがって、SIS 素子を利用して、電圧制御型のマイクロ波雑音源が実現できる。

ところで、雑音電力 P_{AVS} は等価雑音温度 T_N を使って $P_{AVS} = k_B T_N B$ と定義できるので、これを(6)式に代入して等価雑音温度 T_N を求めると、

$$T_N = \left(\frac{e}{2k_B} \right) V_0 = 5.8 \left[\frac{\text{K}}{\text{mV}} \right] \quad (7)$$

となる。(7)式は、インピーダンス整合接続した負荷で取り出せる雑音の等価温度が超伝導トンネル接合のバイアス電圧に比例し、その比例係数が普遍定数 ($e/2k_B = 5.8 \text{ mV/K}$) で与えられることを示している。このことを利用して、 V_G より大きな任意の2つの電圧 V_C, V_H ($V_C < V_H$) に超伝導トンネル接合をバイアスすると、それぞれ、 $T_{N,C} = 5.8 * V_C$ 、 $T_{N,H} = 5.8 * V_H$ で与えられる等価雑音を出力する雑音源が実現できる。そこで、図3のような構成で SIS 素子を雑音源として、デューワー内の冷却増幅器の雑音温度の測定を行ってみた。その結果を図5の赤線で示す。図5の緑線は、半導体雑音源を用いて測定した冷却増幅器の雑音温度で

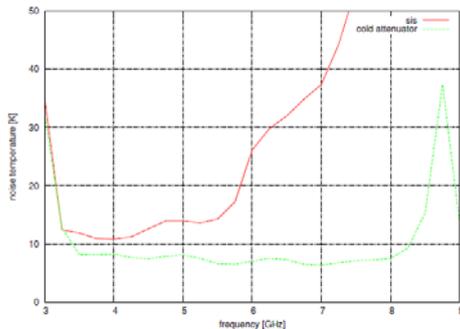


図5 SIS 雑音源を用いて求めた冷却増幅器の雑音温度 (赤線)。緑線は半導体雑音源を用いて求めた同じ冷却増幅器の雑音温度。

あり、今回の測定の参照値である。4GHz以下の低周波領域では、SIS 雑音源で求めた雑音温度は半導体雑音源を用いて求めた値とほぼ一致しているが、高周波側では両者の値は大きく食い違っている。この食い違いの原因は、SIS 雑音源と冷却増幅器との間にインピーダンスの不整合が存在し、SIS 雑音源からの出力が増幅器に結合できていないためと推定している。このインピーダンスの不整合を解消するため、SIS 素子マウントモジュールの見直しと再設計を行っている。

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 10 件)

- ① T. Noguchi, T. Suzuki, A. Endo and T. Tamura, “Contribution of the Imaginary Part of the Superconducting Gap Energy on the SIS Tunneling Current”, Physica C, Special Volume, In press, 2009. (査読有)
- ② T. Nakajima, T. Sakai, S. Asayama, K. Kimura, M. Kawamura, Y. Yonekura, H. Ogawa, N. Kuno, T. Noguchi, M. Tsuboi and R. Kawabe, “A New 100-GHz Band Front-End System with a Waveguide-Type Dual-Polarization Sideband-Separating SIS Receiver for the NRO 45-m Radio Telescope”, Publ. Astron. Soc. Jpn., 60, pp. 435- 443, 2009. (査読有)
- ③ A. Endo, T. Noguchi 他 9 名、2 番目, “A THz SIS Mixer with a NbTiN-Ground Plane and SIS Microtrilayers Directly Grown on a Quartz Substrate”, IEEE Trans. Appl. Supercond., 19, in press, 2009. (査読有)
- ④ 野口 卓、鈴木 仁研、遠藤 光、田村 友範, “SIS接合のサブギャップ電流に及ぼすギャップブロードニングの効果”, 電子情報通信学会技術報告, SCE-108, pp. 11- 16, 2009. (査読無)
- ⑤ T. Nakajima, T. Noguchi, 他 12 名 14 番目, “New 60-cm Radio Survey Telescope with the Sideband-Separating SIS Receiver for the 200 GHz Band”, Publ. Astron. Soc. Japan, 59, pp. 1005- 1016, 2007. (査読有)

- ⑥ S. V. Shitov, O. Koryukin, Y. Uzawa, T. Noguchi and A. V. Uvarov, "Balanced Mixers for ALMA Band-10", IEEE Trans. Appl. Supercond., 17, pp. 347- 350, 2007. (査読有)
- ⑦ A. Endo, T. Noguchi, T. Matsunaga and T. Tamura, "Development of Nb/Al-AlNx/Nb SIS Tunnel Junctions for Submillimeter-Wave Mixers", IEEE Trans. Appl. Supercond., 17, pp. 367- 370, 2007. (査読有)
- ⑧ W. Shan, S. C. Shi, T. Matsunaga, M. Takizawa, A. Endo, T. Noguchi and Y. Uzawa, "Design and Development of SIS mixers for ALMA band 10", IEEE Trans. Appl. Supercond., 17, pp. 363-366, 2007. (査読有)
- ⑨ 野口 卓, "超伝導SIS素子による電波検出技術", 応用物理, 76(1), pp. 39-43, 2007. (査読有)
- ⑩ T. Noguchi, T. Suzuki, A. Endo and T. Tamura, "Superconducting Mixers at Millimeter and Submillimeter Wavelengths for ALMA", Proc. 19th Int. Symp. Superconductivity, p.157, 2006. (査読無)

[学会発表] (計 7件)

- ① 野口 卓, 鈴木 仁研, 遠藤 光, 田村 友範, "SISトンネル電流への複素ギャップエネルギーの効果(II)", 春季応用物理学会, 2009年3月31日、筑波大学.
- ② 井上裕文, 野口 卓, "超伝導トンネル接合を用いた参照信号源の開発", 春季日本天文学会, 2009年3月26日、大阪府立大学.
- ③ H. Inoue and T. Noguchi, "Noise source using SIS junction", 9th Workshop on Submillimeter-wave Receiver Technologies in Eastern Asia, Taipei, Taiwan, Nov. 20, 2008.
- ④ T. Noguchi, "Effect of complex superconducting gap energies on SIS tunneling current", 9th Workshop on Submillimeter-wave Receiver Technologies in Eastern Asia,

Taipei, Taiwan, Nov. 20, 2008.

- ⑤ 野口 卓, 鈴木 仁研, 遠藤 光, 田村 友範, "SISトンネル電流への複素ギャップエネルギーの効果", 秋季応用物理学会, 2008年9月4日、中部大学.
- ⑥ 遠藤 光, 野口 卓 他4名2番目, "マイクロ波励起型窒素原子源によるAlNトンネルバリアの作製", 秋季応用物理学会, 2008年9月3日、中部大学.
- ⑦ 遠藤 光, 野口 卓, 田村 友範, "Nb/Al-AlNx/Nb SIS接合におけるAlNx膜の成長", 春季応用物理学会, 2007年3月27日、青山学院大学.

[図書] (計 2件)

- ① 野口 卓, 超電導の応用新技術(塚本修 監修) 第22章 電磁波検出器、シーエムシー出版, pp.261-271, 2008.
- ② 野口 卓, 超電導Web21、国際超電導産業技術研究センター刊、2007年2月号、pp. 5-6.

[産業財産権]

○出願状況 (計 2件)

- ① 名称: 超伝導トンネル接合の品質評価方法、超伝導トンネル接合の品質評価装置、超伝導トンネル接合素子、及び、超伝導トンネル接合電磁波検出器
発明者: 野口 卓, 田村 友範, 遠藤 光
権利者: 大学共同利用機関法人 自然科学研究機構
種類: 特許権
番号: 特願 2008-187730
出願年月日: 2008年7月18日
国内
- ② 名称: SIS素子、SISミキサ、超伝導集積回路用素子、及び、SIS素子の製造方法
発明者: 遠藤光, 野口卓, 田村 友範, マティアス クロッグ
権利者: 大学共同利用機関法人 自然科学研究機構
種類: 特許権
番号: 特願 2007-26021
出願年月日: 2007年10月3日
国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野口 卓 (NOGUCHI TAKASHI)
国立天文台・先端技術センター・准教授
研究者番号：90237826

(2) 研究分担者

(平成18年度～平成19年度)
小川 英夫 (OGAWA HIDEO)
大阪府立大学・理学研究科・教授
研究者番号：20022717
浅山 信一郎 (ASAYAMA SHINICHIRO)
国立天文台・先端技術センター・助教
研究者番号：60390621

(3) 連携研究者

(平成20年度)
小川 英夫 (OGAWA HIDEO)
大阪府立大学・理学研究科・教授
研究者番号：20022717
浅山 信一郎 (ASAYAMA SHINICHIRO)
国立天文台・先端技術センター・助教
研究者番号：60390621