

## 論文の内容の要旨

論文題目 Tunnel junction as a noise source for millimeter-wave devices

(トンネル接合を用いたミリ波帯雑音源の開発)

氏名 井上裕文

本研究の目的はミリ波、サブミリ波天文学で用いられる検出器の高精度な特性評価を可能にする、トンネル接合を用いた雑音源を開発することである。

電波天文学では分光観測を行う際にヘテロダイン受信機が用いられる。受信機の最も重要な性能指標の一つに雑音温度がある。雑音温度はある信号を検出するのに必要な観測時間と直結するため、世界各地の研究機関で受信機の低雑音化に関する研究が進められている。受信機の実験評価は大ききの分かっている二つの異なる白色雑音を受信機に入力し、二つの出力を比較することで行われる。この時、正確な特性評価のためには、(1) 飽和しないよう、白色雑音の大きさが測定対象の雑音と同程度に微小であること、(2) 物理温度に依存しないこと、が要求される。

二つの導体で数 nm の厚さの絶縁体を挟んだ構造を持つトンネル接合に電圧をかけるとトンネル電流が流れる。トンネル電流を担う電荷はお互いに独立かつランダムに接合を通過するためショットノイズと呼ばれる雑音を生じる。このショットノイズは、バイアス電圧と物理定数のみに依存するのでバイアス電圧を変えることで任意の出力が得られる、物理温度に依存しない、といった特徴を持つため、受信機の高精度な特性評価を可能にする雑音源として

利用できる可能性を秘めている。

そこで本研究ではマイクロ波帯及びミリ波帯において、トンネル接合を利用した雑音源を制作し、受信機の実験評価に応用することを試みた。

第三章ではマイクロ波帯のトンネル接合雑音源を製作し、これを用いて冷却低雑音増幅器の実験評価を行った。

マイクロ波帯の冷却低雑音増幅器は電波天文学で用いられる検出器の初段、または二段目に位置する主要な構成要素である。現在では等価温度にして数 K という超低雑音特性を持つものも登場している。既存の方法ではアバランシェダイオードの出力を減衰器で約 1/100 にすることにより微小な雑音を作り出す。しかしアバランシェダイオードと増幅器の間にある減衰器やケーブルの損失、また減衰器の物理温度に起因する誤差が大きい（十数%）という問題があるため、雑音源と増幅器を直結でき、かつ物理温度に依存しない方法が望まれている。

開発した雑音源はチップと筐体から構成される。設計の際にはトンネル接合で発生するショットノイズを損失・反射なく増幅器に伝えるよう注意した。SIS 接合は Nb-Al/AlO<sub>x</sub>-Nb 接合を採用し、接合自身の幾何的容量を抑えるためにサイズを  $1 \times 1 \mu\text{m}^2$  とした。また被測定物との整合をとるために、バリアの酸化条件を調節し常伝導抵抗を  $50 \Omega$  とした。

開発した SIS 雑音源を用いて冷却低雑音増幅器の実験評価を行い、既存の常温アバランシェダイオードと冷却減衰器を用いる方法と比較した。見積もられた雑音温度は SIS 雑音源を用いた方が 1.5 K 程度系統的に高いという結果が得られたが、この違いは既存の方法で用いた同軸型冷却減衰器の外部導体と内部導体の物理温度の差、あるいはアバランシェダイオードの出力誤差によるものと考えられる。

第四章ではマイクロ波帯で得られた良好な結果をふまえ、ミリ波帯での SIS 雑音源の開発に取り組んだ。

ミリ波帯で用いられる SIS ミキサは超高感度であるがゆえに、強度の強い信号を入力すると飽和を起こしてしまう。受信機の飽和特性は、入力する雑音強度を連続的に変化させることで調査することができる。熱雑音源は出力を連続的に変化させることが可能であるが、雑音源を加熱すると測定対象である受信機をも加熱してしまい、受信機特性に影響を与えずに測定を行うことは難しい。トンネル接合で生ずるショットノイズは物理温度に依存せず、バイアス電圧を変えることで雑音強度を連続的に変えることができるため、飽和特性の調査に応

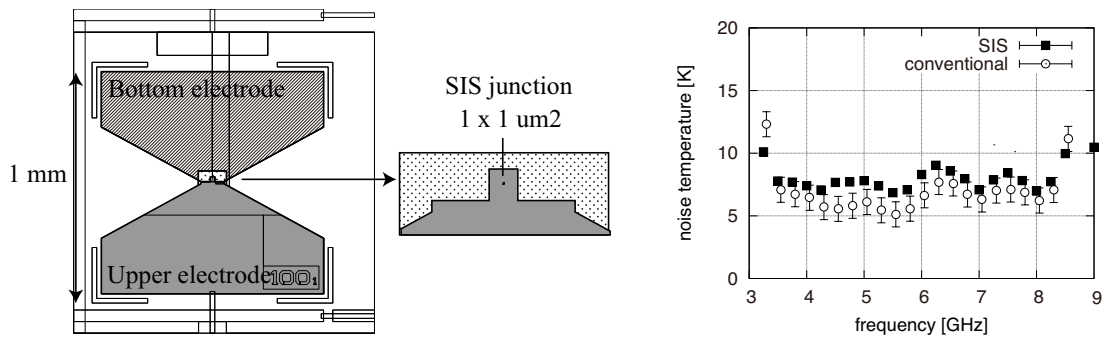


Figure 1: (左) マイクロ波帯雑音源チップ。(右)SIS 雑音源と既存のアバランシェダイオード雑音源で測定した冷却増幅器の雑音温度。

用できる可能性を秘めている。本研究では 100 GHz 帯 SIS 雑音源の開発に取り組んだ。

ミリ波帯 SIS 雑音源はマイクロ波帯 SIS 雑音源同様にチップと筐体からなる。ミリ波帯ではマイクロ波帯と異なり導波管出力とした。チップはトンネル接合、マッチング回路、バイアス回路の役目も果たすチョークフィルタ、マイクロストリップ-導波管変換から構成される。ミリ波という高い周波数帯では接合自身の幾何学的容量が無視できなくなるため、接合容量を打ち消すためのマッチング回路が必要となる。本研究では接合と並列にインダクタンスを並べた shunt inductance type のマッチング回路を用いた。広帯域で動作するようにマッチング回路を最適化し、90-110 GHz で反射係数が-20 dB となる SIS 雑音源を設計した。

SIS 雑音源と共にその雑音源の出力を検出するための SIS ミキサも設計した。SIS ミキサも SIS 雑音源同様、チップと筐体からなり、チップはトンネル接合、マッチング回路、バイアス回路の役目も果たすチョークフィルタ、マイクロストリップ-導波管変換から構成される。マイクロストリップ-導波管変換はボウタイ型を採用した。マッチング回路は伝送線路の終端に接合がある end-loaded type を用いた。マッチング回路で用いられる伝送線路はマイクロストリップラインとコプレーナ導波路から構成される Capacitively Loaded CPW (CLCPW) を用いて実装した。Tucker 理論に基づいたシミュレーションによりマッチング回路を最適化し、80-120 GHz において安定かつ雑音温度が 10-20 K、利得が 0 dB となる SIS 受信機を設計した。

設計した SIS 雑音源と SIS 受信機を用いて 100 GHz 帯でのショットノイズの検出を試みた。その結果、100 GHz というミリ波帯でトンネル接合から出力されるショットノイズをヘテ

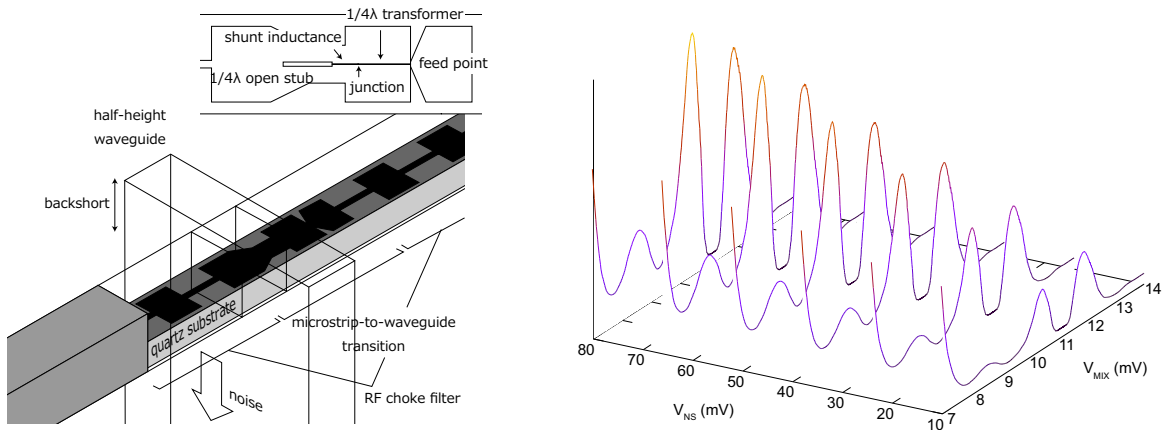


Figure 2: (左) ミリ波帯雑音源。(右) 雑音源にかけたバイアス電圧と SIS 受信機の応答.

ロダイシステムを用いて初めて検出した。雑音源の出力はバイアス電圧に対して単調に増加したが、理論が示すような線形とはならなかった。そのような特徴の一つとして、出力電力-電圧曲線の 10 mV 付近に不連続があった。この不連続は電流-電圧特性にも見られた。物理温度依存性の振る舞いからこれは配線に weak link があるためと考えられる。また高いバイアス電圧で飽和傾向が見られた。この飽和傾向は電流電圧特性にも見られた。これは高いバイアス電圧を接合にかけると、接合で生じたジュール熱により接合周辺の超伝導性が破壊され、そこで電圧降下が起こっているためと考えられる。超伝導性が破壊された領域、温度が高くなっている領域では高周波損失も生じるため、電圧-電力特性の飽和的な振る舞いを強くするように働く。

SIS 雑音源出力の等価温度を見積もるために、既存の熱雑音源に対する SIS 受信機の応答と比較した。その結果、理論的が予測する値の 8 割程度の等価温度を SIS 受信機が検出していることが分かった。

また帯域の端では既存の熱雑音源と SIS 雑音源を入力した時に SIS ミクサの電流電圧特性が重ならないという現象が観測された。これは SIS 雑音源の反射係数が劣化することで SIS ミクサの embedding impedance が変化してしまったためと考えられる。

第五章では、本研究のまとめ及び観測された問題点の解決法について述べた。