

氏 名 武 田 正 典

学位（専攻分野） 博士(工学)

学 位 記 番 号 総研大甲第633号

学位授与の日付 平成14年9月30日

学位授与の要件 数物科学研究科 天文科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 Study on Broadband SIS Receivers With Nb/AlOx/Nb Tunnel  
Junctions at Millimeter Wavelengths

論 文 審 査 委 員 主 査 教授 川邊 良平  
助教授 野口 卓  
助教授 松尾 宏  
助教授 関本 裕太郎（国立天文台）  
招聘研究員 稲谷 順司（宇宙開発事業団）  
グループリーダー 王 鎮（独立行政法人通信総合研究所）

**学位論文題目 Study on Broadband SIS Receivers with Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb Tunnel Junctions at Millimeter Wavelengths**

超伝導トンネル接合 (SIS 接合) に電磁波を照射することにより、対電子が壊れて生じた準粒子がフォトンのエネルギーを吸収してトンネル電流が流れる。このような量子効果を利用した SIS ミクサの研究が、電波天文観測や地球環境計測などに応用するため、近年盛んに行われている。SIS ミクサは、従来の古典的な半導体ミクサと比較して最大でも数  $\mu\text{W}$  と非常に小さい LO 電力で動作可能であり、ミリ波・サブミリ波帯で量子雑音限界を達成し得る最も低雑音かつ高感度検出器として主に電波天文観測及び地球環境計測に用いられている。特に広帯域特性を兼ね備えた SIS ミクサの開発は、観測システムの簡略化及びコストの削減に結びつくため、電波干渉計やマルチビーム受信機など複雑な観測システムに対して不可欠である。本論文では、Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb トンネル接合を用いたミリ波帯における広帯域高感度 SIS ミクサの設計・試作及び性能評価について論じ、本研究が広帯域受信機技術の確立に有用なことを示している。本論文は全 7 章から構成されている。

第 1 章「序論」では、一般的な電波望遠鏡受信機の仕組み、SIS ミクサの特徴及び現状を概説するとともに広帯域受信機の重要性を説き、本論文で取り扱う研究テーマの研究意義を明らかにしている。

第 2 章「SIS ミクサの基礎理論」では、本論文の基礎となる超伝導及び SIS ミクサの理論的背景を記述している。特に SIS ミクサの理論解析及び設計に必要な量子ミキシング理論及び超伝導マイクロストリップ線路の理論について詳しく述べている。

第 3 章「SIS ミクサの歴史的背景」では、現在までに報告されている幾つかの同調回路集積化 SIS ミクサの特徴を述べた。広帯域 SIS ミクサを開発するにあたり、従来の単一接合を用いた SIS ミクサでは接合の臨界電流密度を増加しなければならないことを示した。臨界電流密度の増加は接合の品質の劣化及び接合プロセス時における歩留りの劣化を導く恐れがあるため、帯域特性が従来の単一接合 SIS ミクサよりも臨界電流密度に強く依存しない並列多接合アレイ型 SIS ミクサを紹介し、そのミキシング性能の理論解析を行うために必要な大信号及び小信号モデルについて記述した。また並列多接合アレイ型 SIS ミクサの雑音温度及び変換利得の理論計算を行い、その特徴及び問題点を明らかにした。

第 4 章「190-300 GHz 帯導波管型 SIS ミクサの設計」では、導波管回路技術を用いた広帯域 SIS ミクサの設計を重点に検討を行った。前章で明らかになった並列多接合アレイ型 SIS ミクサの問題点を克服するため、各接合において異なる接合面積及び接合間隔を用いた不均一並列多接合アレイ型 SIS ミクサを新しく提案し、その設計指標及びミキシング性能の理論解析について詳しく記述した。構築した理論解析を設計した不均一並列多接合アレイ型 SIS ミクサに適用した結果、均一並列多接合アレイ型 SIS ミクサで生ずる問題点は解消することができ、従来の単一接合 SIS ミクサよりも十分低い臨界電流密度にも関わらず、その受信機雑音温度は広帯域にわたり非常に平坦な周波数特性を示すことを予測した。また導波管プローブを用いた入力導波管回路、RF インピーダンストランスフォーマ及び RF チョークフィルタの設計及び理論特性について述べた。

第5章「Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb トンネル接合の作製」では、本研究で使用する SIS ミクサ素子の作製プロセス及びその直流特性評価を示している。作製プロセスは接合周辺に陽極酸化を取り入れた SNEP(Selective Niobium Etching Process)に基づいており、作製した SIS 接合の直流特性評価からほぼ設計値通りの臨界電流密度を持つ良好な I-V 特性が得られていることを示した。

第6章「受信機性能の実験結果」では、不均一並列多接合アレイを用いた 110-180 GHz 帯及び 190-300 GHz 帯導波管型 SIS ミクサの受信機性能測定について詳しく述べている。110-180 GHz 帯 SIS ミクサのヘテロダイン測定では、IF 回路基板と冷却 HEMT 増幅器間のインピーダンス不整合のための IF 出力パワーの低下による変換利得の劣化及び標準のものより大きい雑音を有する冷却 HEMT 増幅器を使用したため受信機雑音温度は比較的高いものとなったが、その帯域特性は従来の PCTJ(Parallel Connected Twin Junction)型 SIS ミクサより十分広帯域特性になっていることを示した。また 190-300 GHz 帯 SIS ミクサにおいてはヘテロダイン測定及びフーリエ分光測定を行い、受信機雑音温度と FTS 応答が矛盾無く良く対応していることを示した。従来の並列多接合アレイとの受信機性能の比較はフーリエ分光測定を用いて行い、理論解析で予測した問題点が不均一並列多接合アレイにおいて改善できることを明らかにした。この不均一並列多接合アレイ型 SIS ミクサの受信機雑音温度は 202-284 GHz にわたり量子限界雑音の約 5 倍程度であり、その帯域性能は導波管等による入力回路によって制限されていることを示した。

第7章「総括」では、総括であり、本研究で得られた成果を要約し、本研究で提案した SIS ミクサの将来的な応用について述べている。

## 論文の審査結果の要旨

サブミリ波計測は、天文観測、地球大気観測、物性、分子分光、生体研究などの基礎研究から、半導体など各種材料の品質評価、超高速通信など多岐にわたる応用が検討されており、それらの応用の有用性が認識されるにつれ、サブミリ波の高感度検出技術およびその周辺技術の開発の必要性が急速に高まってきている。特に、天文学分野では、サブミリ波帯の観測装置を搭載した100台規模の望遠鏡をチリのアタカマ高地に建設する日米欧の国際共同プロジェクト（ALMA計画）が進行中であり、未開拓のサブミリ波帯での原始銀河や原始惑星系の観測から、宇宙や太陽系の起源に関する重要な手掛りが得られるものと期待されている。ALMAのような大型電波干渉計においては、観測装置の高感度化（低雑音化）は最重要課題であることはいうまでもないが、それぞれの装置の観測周波数帯域を広げること、観測装置の簡略化や製造コストの削減をはかる上で大きな開発課題となっている。

本申請者は、このような状況を背景に、ALMAをはじめとするミリ波帯からサブミリ波帯の電波観測装置に利用される超伝導ミキサ（SISミキサ）に注目し、極めて広い周波数範囲で高感度（低雑音）特性を実現する新しいタイプのSISミキサを考案し、数値解析によりその高性能性を示した。さらに、その設計手法を確立し、それに基づいた超伝導ミキサを製作し、低雑音でしかも広い動作周波数帯域を有するSISミキサを実現できることを実証した。

まず、本申請者は、これまで報告されたSISミキサの動作周波数帯域を広げる方法を詳しく検討し、それらの方法をサブミリ波帯SISミキサに適用した場合の問題点を指摘している。すなわち、サブミリ波帯のミキサに用いられるSIS接合の臨界電流密度は非常に高くなるため、接合特性の劣化を引き起こしミキサとしての性能を劣化させること、および、接合面積が著しく小さくなることに伴う加工技術の複雑化や製造上の歩留まりの低下が発生することである。そこで、本申請者は、臨界電流密度が小さくでき、しかも、通常の光露光で製作できる面積のSIS接合を用いた広帯域SISミキサの可能性とその具体化を検討した。その結果、面積の異なる複数個のSIS接合をストリップ線路上に配置した「不均一並列多接合型SISミキサ」という新しい概念を考案するにいたった。

次に、本申請者は、不均一並列多接合型SISミキサの数値的な解析を行った。この数値解析では、J. R. Tuckerにより開発された単一接合型SISミキサに対する量子ミキシング理論を並列多接合型SISミキサに適用するための拡張がなされている。さらに、この並列多接合型SISミキサに対する拡張された量子ミキシング理論を用いて、ミキサの変換効率や雑音温度等の性能指標の数値計算を行い、従来SISミキサに比べて臨界電流密度が低いにも関わらず、広い周波数帯域にわたって平坦な低雑音特性を有するSISミキサが実現可能であることを数値的（理論的）に示した。

ところで、不均一並列多接合型SISミキサでは、ある与えられた接合数に対して、各接合の面積と各接合間の距離が未知数となるが、これらをミキサの雑音温度が最も広い周波数帯域にわたって最小となるような組み合わせを探し出す必要がある。このために、申請者は、マイクロ波CADを利用した線形回路解析により、入力端での信号の反射が最小となる接合の面積と間隔の組み合わせを求める方法を提案している。この方法により、幾

つかの接合面積と間隔の組み合わせを得た後、それらの各組み合わせに対して、拡張された量子ミキシング理論によりSISミキサとしての性能を計算し、最も低雑音で広帯域になる接合面積と間隔の組み合わせを決定することにした。そして、以上の線形解析と数値解析をイテレーティブに繰り返すことにより、最も広い周波数帯域で低雑音特性を示す並列多接合SISミキサの各接合面積と接合間隔を求めることができることを示し、不均一並列多接合SISミキサの設計および性能予測が可能であることを示した。

さらに、申請者は、以上の手法を用いて設計した不均一並列多接合型SISミキサNb/AIO<sub>x</sub>/Nb接合を実際に製作し、フーリエ分光測定やヘテロダイン測定等の性能評価実験を行った。その結果、250GHz帯のミキサでは、接合の臨界電流密度が従来の約半分にも関わらず、202-284GHz（比帯域約35%）にわたって、量子限界雑音（ $h\nu/k$ 、 $h$ ：プランク定数、 $\nu$ ：周波数、 $k$ ：ボルツマン定数）のわずか5倍程度という、低雑音で超広帯域特性を実現することができた。ここで実現された性能は、これまで報告された同周波数帯域の最高性能のSISミキサと同等あるいはそれを凌ぐものであり、接合の臨界電流密度が従来のものに比べて半分以下であることを考慮すると、世界最高性能のSISミキサといっても過言ではない。

以上のように、申請者は、サブミリ波帯の広帯域SISミキサの開発上難点となっている臨界電流密度をできるだけ低く抑さえ、しかも接合面積を光露光で実現できる大きさに保ったままでも、従来のSISミキサを凌駕する性能のSISミキサを実現する方法を開発した。この方法は、今後、ALMA等のサブミリ波受信機にも応用可能であり、サブミリ波天文観測だけでなく大気観測、物性計測などのための超広帯域低雑音観測システムに利用できるものと期待している。