

論文審査の結果の要旨

氏名 遠 藤 光

本論文は、ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) 等への応用を目指して行われた、SIS (Superconductor - Insulator - Superconductor) トンネル接合素子の開発について述べたものである。

論文は9章からなり、第1章は導入部である。この章では、ALMAによるテラヘルツ帯観測で目指す天文学、ヘテロダイン検出におけるミクサ、あるいはフォトン直接検出に用いられる SIS 素子の動作原理と、その性能を表す様々なパラメータの定義が記述され、また先行研究の到達点と本研究の開発目標が述べられている。すなわち、ALMA で要求される低雑音・広帯域のミクサを実現するためにはきわめて低いトンネル抵抗率と漏洩電流が要求されるが、従来絶縁膜に用いられてきた酸化アルミニウム (AlO_x) 膜では、膜の欠陥に起因する漏洩電流により要求を満たせていないこと、また窒化アルミニウム (AlN) を用いてより良い結果が得られた例があるものの、改善の理由が明確でないことが指摘され、本研究では改善をもたらす製膜過程の理解と、 AlN 膜を用いた高性能 SIS 素子の製作、応用を目指すことが述べられている。

第2章は、SIS接合の製造プロセス、製造装置、及び電流-電圧特性等の評価装置の概要が与えられている。ここでは、最新のステッパー装置により直径が $1\mu\text{m}$ 以下のSIS接合を高精度で製作することができる高い技術が特に注目される。

本研究では、アルミニウムを窒化して AlN 膜を形成する際の窒素原子供給源として2種類のプラズマ源が用いられており、第3章では、先行研究の多い容量結合型プラズマ (CCP) を用いた窒化膜製造実験について、その手法と製作された AlN 膜の評価結果が与えられている。この方法についても論文提出者は詳細な製膜過程の理解を試み、再現性の向上等の成果を得ているが、ALMAで要求される低トンネル抵抗率、低漏洩電流はこの手法では実現されなかった。

第4章は、論文申請者独自の試みである電子サイクロトロン共鳴 (ECR) 型のリモートプラズマ源を用いた AlN 製膜実験について記述している。この窒素供給源を用いて試作したSIS接合は、非常に低いトンネル抵抗率 (トンネル抵抗率 R_T と接合面積 A の積の値が $R_T A = 7\ \Omega\mu\text{m}^2$) でしかも欠陥が少ない、ALMAの要求仕様を上回る高い性能を示した。本章ではプラズマ源の発光スペクトルが調べられており、ECR方式では、CCP方式にも共通して見られる N_2 、 N_2^+ に起因する発光スペクトルに加えて、窒素原子 N の発光が見られることが示されている。すなわち、反応性の高い窒素原子はアルミニウム層への侵入が浅く、表面を集中的に窒化することにより薄くて高品質の窒化膜が形成されることが推定されている。この結果は絶縁膜のさらなる特性改善に対する指針を与えるものとして高く評価される。

第5章では、第4章で記述された AlN 膜の透過型電子顕微鏡による観察結果

が述べられている。電子顕微鏡像は、AlN層が先行研究よりも薄い1 nm程度で均一であり、これが低いトンネル抵抗率等を実現していることを示している。

第6章では、厚いAlN膜を持つSIS接合の漏洩電流について議論している。これは、SIS接合をフォトンの直接検出器として用いた場合の暗電流に対応する。4.2 Kから0.3 Kの温度において、漏洩電流のバイアス電圧依存性は理想的な絶縁膜を仮定した理論曲線で良く再現され、漏洩電流の原因は、絶縁膜ではなく超伝導体の方にあることを結論している。これは、SIS直接検出器の性能向上には、これまで注目されてきた絶縁膜における欠陥の低減だけでなく、超伝導体自身の品質を高める必要があることを示した点で重要である。

第7章では、開発したSIS接合を用いたテラヘルツ帯用ミキサの試作について記述している。ここでは μm サイズのSIS接合を、マイクロストリップ線路上に形成する従来の構造とは異なり、両者が直接水晶基板に接する新しいデバイス構造を提案している。これによりSIS接合の特性が下層の物性に左右されず、またジュール熱を逃がすのにも有利とされている。試作されたSIS接合は、4章に述べられたものと遜色ない電流—電圧特性を維持していることが述べられている。

第8章は、ALMAでの使用に先立つ、ASTE (Atacama Submillimeter Telescope Experiment) 望遠鏡用800 GHz帯受信機のミキサへの、SIS接合の応用が記述されている。ここでは試作SISミキサを搭載した受信機が温度4 Kで試験され、ALMAでの要求を満たす雑音温度を達成したことが述べられている。

第9章は、本論文のまとめであり、SIS接合開発の到達点、及び将来の展望が述べられている。

本研究は独自の工夫により非常に高い性能のSIS接合を開発し、野心的なALMAの要求仕様をも満たすSISミキサを実現した点で天文学にとって重要であるだけでなく、さらに広い応用分野における高性能SISデバイス開発にも大きな影響を与えるものであり、高く評価できる。

なお本論文の各章は、以下に示す研究者との共同研究である。しかし、論文提出者が主体となって研究を行っており、論文提出者の寄与は十分であると判断できる。したがって、博士(理学)の学位を授与できると認める。

第3章：野口卓、松永昭彦、田村友範、Matthias Kroug

第4章：野口卓、Matthias Kroug、井上裕文、田村友範

第6章：野口卓、田村友範

第7章：野口卓、Matthias Kroug、Sergey V. Shitov、Wenlei Shan、田村友範、鵜澤佳徳、酒井剛、井上裕文、河野孝太郎