

氏 名 有 吉 誠一郎

学位（専攻分野） 博士(工学)

学 位 記 番 号 総研大甲第754号

学位授与の日付 平成16年3月24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 Submillimeter-wave Direct Detectors with  
Nb-based Superconducting Tunnel Junctions

論 文 審 査 委 員 主 査 教授 近田 義広  
助教授 野口 卓  
助教授 松尾 宏  
教授 芝井 広（名古屋大学）  
教授 満田 和久（独立行政法人宇宙航空研究開発  
機構）  
主任研究 稲谷 順司（独立行政法人宇宙航空研究開  
発  
員 発機構）

## 論文内容の要旨

### [0]本研究の背景と目的

電波領域で最も周波数の高いバンドであるサブミリ波帯（ $1\text{mm}\sim 100\mu\text{m}$ 、周波数  $300\text{GHz}\sim 3\text{THz}$ ）は、初期宇宙における銀河の爆発的星形成領域の星間塵（ダスト）から放射された強力かつ赤方偏移した連続波放射の重要な観測波長帯であり、原始銀河探査や銀河形成・進化の解明のための新しいプローブとして期待される。銀河形成・進化の解明には、赤方偏移が 1 を超えるような爆発的星形成（スターバースト）銀河を広域探査し、初期宇宙の各年代に対する個数密度を統計的に明らかにする必要がある。この目的には、遠方スターバースト銀河のもっとも強い放射波長域であるサブミリ波帯での広範囲観測が極めて有効である。そこで、このような広域サーベイ観測を実現する超高感度検出器として超伝導トンネル接合素子（superconducting Tunnel Junction, STJ）を用いた次世代型サブミリ波帯フォトン検出器の研究開発に取り組んできた。この検出器の大規模撮像アレイ化（ $\sim 1000$  画素）により、スターバースト銀河の個数密度の赤方偏移依存症を観測的に明らかにし、銀河、銀河内の星、銀河中心核の巨大なブラックホールなどの形成・進化の歴史を明らかにすることが本研究の最終目標である。

このような検出器開発のために、[1]サブミリ波直接検出器の実現可能性の検討と検出器の設計、[2]プロトタイプ検出器の開発と作成、[3]サブミリ波直接検出器の性能評価、を行った。

### [1]サブミリ波直接検出器の実現可能性の検討と検出器の設計

まず、英国 Oxford Instruments 社製の接合サイズ  $3\text{-}50\mu\text{m}$  の超微小 STJ 素子を用いて、 $0.3\text{K}$  という極低温での漏れ電流やノイズ特性等の実験室評価を行った。また、STJ 素子の高精度かつ安定な動作の実現のために、微小漏れ電流に対応した読み出し回路の設計・製作や冷却型の電界効果トランジスタ (FET) の採用、外部干渉の低減、磁気シールドの導入等、測定系最適化の検討を行った。その結果、「雑音等価電力 (NEP)  $\times$  量子効率」にして  $10^{-18}\text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$  という極めて高感度で低雑音という性能が実現可能であることを世界で初めて実験的に実証し、STJ 素子を用いた直接検出器がサブミリ連続波の超高感度観測に応用可能であることを示した。この結果を踏まえ、天文観測地である南米チリ・アタカマ大地での大気透過率に合致することを想定し、検出器感度の中心周波数  $650\text{GHz}$  ( $450\mu\text{m}$ )、比帯域幅 10% の検出器の設計を行った。特に、検出器感度の広帯域化のために STJ 素子を複数個並列配置した分散型接合の概念を採用した。また、将来の大規模イメージングアレイ化を考慮し、平面アンテナを用いた準光学的カップリング方式を採用した。

### [2]プロトタイプ検出器の開発と作成

[1]の設計に基づき、国立天文台と理研との共同研究のもと、理研の超伝導薄膜作成専用プロセスラインを利用したサブミリ波用 STJ 検出器の作成を新規に開始した。検出器 1 画素は、ニオブ (Nb) 超伝導体の対数周期型平面アンテナと、6 個並列を 2 個直列配置した STJ 素子をインピーダンス変換マイクロストリップ線路でブリッジした構造を持つ。STJ 素子の膜構造は Nb/Al/AlO<sub>x</sub>/Al/Nb で、Nb と Al 超伝導体で薄い AlO<sub>x</sub>

絶縁層（約 1.5mm）を挟んでいる。

サブミリ波直接検出の実現のために新規に必要な STJ 素子単体の作成技術は以下の 4 点である。「①素子サイズが 2-3 $\mu\text{m}\phi$  と微小であること」、「②クーパー対のトンネル電流の最大値（臨界電流密度）が約 1000A/cm<sup>2</sup> と高いこと」、「③単一準粒子（励起電子）のトンネル電流の最小値（漏れ電流）が約 0.1pA/ $\mu\text{m}^2$ （10 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ）と低いこと」、「④多素子化のために①~③を満たす STJ 素子が高い再現性で作製できること」である。

上記 4 項目のうち、③に示したような圧倒的に質の高いトンネル障壁は①②とは相反する要求であり、これらを両立させる技術は未開発であった。①~④の実現にあたって考慮した項目は、「素子縁端部からの電流の流れ」と「接合面全体に分布するミクロな膜不良による上下電極のマイクロショート」である。まず、「縁端部からの漏れ」の解決のために、素子縁端部の電氣的絶縁方法を従来の“酸素プラズマによる酸化法”のかわりに“特殊電解液による酸化法（陽極酸化法）”を新規に導入した。また、「マイクロショート」の解決を目的として、生膜装置のスパッタ電圧やプラズマガス圧に対する膜応力依存性を調べて写真を撮り、きわめて膜質の平坦性が高いことを確認した。

以上により、サブミリ波検出器用途の STJ 素子を 90%以上という高い歩留まりで作成することに成功した。

### [3]サブミリ波直接検出器の性能評価

[2]の結果を経て、STJ 検出器を作成し 440GHz 帯の直接検出を実験的に示した。

現在は、検出器 1 画素の実験室での定量的評価（周波数感度特性、ノイズ特性、検出効率、線形性、読み出し時定数、ビームパターン等）をほぼ完結した。

まず、周波数感度特性に関しては、南米チリの ASTE (Atacama submillimeter Telescope Experiment) 観測サイトの大気透過窓に合致した 650GHz (450 $\mu\text{m}$ ) 帯 STJ 検出器による直接検出を実現した。読み出し時定数、ビームパターン(F=2)は、設計値と極めてよく一致した測定結果を得た。また、検出効率の測定値は 0.2-0.3 程度であり、検出器の電流感度に換算して $\sim 50\text{A}/\text{W}$  に相当する。この値は理論値(370A/W)に比べて 1/2 $\sim$ 1/3 倍低い値になっており、この原因を究明するために数値解析を行った。その結果、STJ 素子のトンネル障壁の臨界電流密度をさらに 2 倍程度高くすることによって検出効率の向上が期待できることを示した。検出器自身から発生するノイズ特性は、検出器を構成する STJ 素子の極めて低い漏れ電流に起因した 10fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$  という低いショットノイズ特性をもつことを実験的に示した。この低ノイズレベルと検出効率の測定により、雑音透過電力(NEP)にして 10<sup>-16</sup>W/ $\sqrt{\text{Hz}}$  という高い検出性能を実証した。

本研究成果は、サブミリ波帯での大規模イメージング実現を目指した次世代型検出器が、地上天文観測に応用可能なレベルに達したことを示すものであり、ASTE10m 望遠鏡に搭載する新観測装置として、「サブミリ波カメラ」の実現性が飛躍的に向上した。

また、本研究成果によって、産業応用を目指した THz (テラヘルツ) 帯イメージングシステムの開発プロジェクトが理研でスタートした。THz 工はプラスチックや紙、木材、骨、

乾燥食品等には透過し、金属や水分には不透明の特性をもつ。この特性を生かした皮膚がんの早期発見や半導体基盤の欠陥検査、乾燥食品の非破壊検査、DNA やたんぱく質の生体内構造解析等、その応用範囲は産業界全体に広く波及すると期待される。

## 論文審査結果の要旨

サブミリ波領域とは、周波数 300-1000GHz の電磁波領域を指し、多くの天体の形成期に発する熱放射や輝線放射が観測される。大型高精度望遠鏡および受信機技術の進歩により、原始銀河の探査や星・惑星系形成領域の観測が可能となってきた。しかしながら、他の電磁波領域の観測と比較し、観測可能な視野が狭く、広視野の観測を実現することが難しい領域でもある。

これまで、サブミリ派の連続は観測には熱検出器であるボロメータが用いられてきた。ボロメータは 0.3K 以下に冷却することで大気放射限界の感度を達成する検出器であり、これまでに 100 素子程度の検出器アレイが実現されている。ボロメータの大規模アレイ化を目指した開発が海外の研究機関で進められているが、未だ実用化には到っていない。申請者はサブミリ波領域での連続波観測性能を飛躍的に向上させるため、ボロメータに代わる新しい検出器として、超伝導ニオブのトンネル接合 (STJ) を用いたサブミリ波直接検出器の開発を行った。超伝導直接検出器はフォトンのエネルギーを超伝導のギャップを用いて準粒子の電流として読み出すことができる量子型の検出器である。ボロメータの性能を超えることが期待される次世代のサブミリ波検出器と考えられる。

本申請論文は、サブミリ波帯 (650GHz) に感度を持つ STJ 検出器の設計・製作・評価を行い、STJ 検出器がサブミリ波観測装置として実用となる性能を実証したものであり、多くの検出特性でボロメータの性能を超えることが示されている。この論文の要点は以下の 3 つである。

### 1. 検出素子の広帯域設計

拡散接合 (DJ) を直接検出器に導入し、比較的電流密度の低い ( $1\text{kmA}/\text{cm}^2$ ) STJ 素子を用いて 650GHz 帯で広帯域の入力結合をとる設計手法を確立した。数値解析により複数の共振周波数の振る舞いを求め、DJ の素子数及び共振インダクタンスに必要な条件を示した。

### 2. 低リーク微小 STJ 素子の製作

理化学研究所の超伝導薄膜製造設備を用いて STJ 素子の作成を行った。超伝導薄膜の膜内応力の低減、縁端部絶縁のための陽極酸化法の導入、5 層構造 (Nb/Al-Alox/Al/Nb) の採用により、0.3K で 6pA のリーク電流を持つ STJ を製作した。5 層構造が 4 層構造 (Nb/Al-Alox/Al/Nb) に対して低リーク特性の点で優れていることが TEM (Transmission Electron Microscope) 観察及びリーク電流の測定で示された。

### 3. 検出素子の性能評価

12 個の STJ 素子を用いた 650GHz 帯 STJ 検出器の性能評価が行われた。リーク電流として 0.3K において約 100pA であること、ノイズ電流がショットノイズ ( $10\text{fA}/\sqrt{\text{Hz}}$ ) であることが示された。国体高原及びフーリエ分光器を用いた光学実験を行うことで、波長感度、絶対感度、線形性、時定数、ビーム形状が評価され、NEP (Noise Equivalent Power) が  $2 \times 10^{-16}\text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$  であり、サブミリ波帯での大気放射雑音の感度が実現された。動作温度条件、線形性、時定数の点でもボロメータに対する優位性が示された。

以上、申請者の研究成果は、超伝導直接検出器がサブミリ波帯の広帯域高感度検出器と

して優れた性能を示したものであり、ボロメータの性能を超える検出素子として世界のサブミリ波検出器開発グループの注目を集めることとなった。本研究成果は、サブミリ波を含むテラヘルツ領域の検出器として新たな方向性を示したものであり、天文学に限らず多くの学問分野での応用は期待され、将来への発展性も含めて高く評価できる。

審査委員全員出席のもと、公開の論文発表会を行った。申請者による論文内容の口頭発表を 40 分間行い、審査委員及び一般聴講者による質疑応答を 20 分間行った。申請者は、研究の背景について説明し、超伝導直接検出器の設計手法、製作・評価について独自性・独創性のある点について明確な説明を行った。質疑に対しては明快に受け答えを行った。審査委員のみによる審議を行い、論文の技術的な価値を十分に認められること、出版済みの学術論文についても本申請論文に関する申請者の研究内容であることを確認することができた。また、論文が明快な英文で書かれていることから、語学力についても問題ないことを確認した。

以上の試験の結果、申請者は天文科学専攻において、博士（工学）の学位を受けるにふさわしい力量を持つものと認め、審査委員全員一致により合格と判定した。