

称号及び氏名	博士（理学）	小嶋 崇文
学位授与の日付	平成 22 年 3 月 31 日	
論文名	「Quantum-limited 0.78–0.95 - THz Waveguide SIS Mixers for the ALMA Band 10 Receivers (ALMA Band 10 受信機に用いる 0.78-0.95 THz 帯 超低雑音 SIS ミキサ)」	
論文審査委員	主査	小川 英夫
	副査	大西 利和
	副査	細越 裕子
	副査	鶴澤 佳徳

論文要旨

Superconductor-Insulator-Superconductor (SIS) ミキサは電磁波のヘテロダイン検出に最も高感度な検出器であり、電波天文学におけるミリ波サブミリ波の輝線・連続波観測に広く用いられてきた。SIS ミキサは、導波管回路、低損失伝送線路、そしてミキシングを担う SIS 接合から成る。テラヘルツ帯は電波天文学や通信分野においても長く未開拓周波数帯であったため、現在その発展のために SIS ミキサの広帯域・高感度化が期待されている。

Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) 計画は、日米欧 3 者が協力し南米チリ・アンデス山脈の標高 5000 m のアタカマ高地に 66 基の電波望遠鏡を設置する巨大電波干渉計建設プロジェクトであり、2012 年から本格運用開始が予定されている。観測周波数は 30 GHz–0.950 THz であり、受信機はその大気窓をカバーするように 10 個の周波数帯に分割して最適化され、30 年という長期運用に耐え、メンテナンスが容易なようにカートリッジ型受信機が採用されている (図 1)。Band 10 は、ALMA プロジェクトの最高周波数帯であり 0.787–0.950 THz をカバーする。Band 10 は、0.01 秒角という高空間分解能を生かした原始惑星系円盤の内部構造と進化の解明が期待される周波数帯である。

このようなチャレンジングな観測を実現するために、ALMA 計画では厳しい受信機仕様の要求があり、Band 10 では量子限界雑音温度の 5 倍である 230 K という受信機雑音温度をその帯域の 80% に渡って達成する必要がある。最も困難な開発要素は SIS ミキサ (図 2) であるが、これまで技術的困難によりこの超低雑音・広帯域特性を満たすミキサは存在し

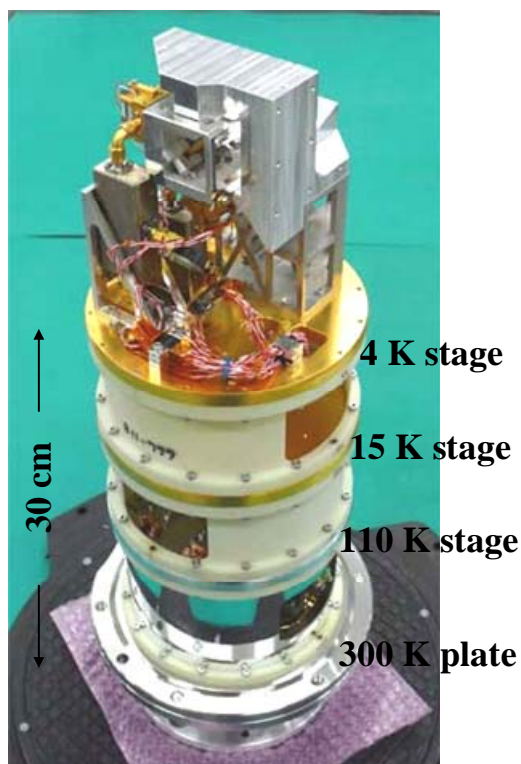


図 1 プロトタイプカートリッジの写真

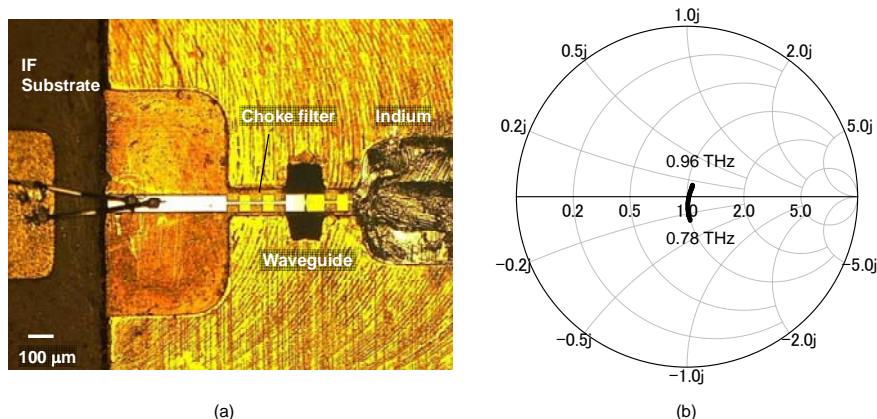


図2 (a) SIS ミキサ内部の写真ミキサチップと (b) ミキサチップ導波管-マイクロストリップ変換の給電部分のインピーダンス。このスミスチャートは 30Ω で規格化している。

なかった。他のバンドでは量子限界雑音の数倍という受信機が成功裏に開発されてきたこととは対照的に、当周波数帯の最大の困難は、高い信頼性のある全Nb-SIS ミキサを用いることが出来ないことにある。これは当周波数帯がNb のギャップ周波数（約 0.7 THz）以上であるために、Nb の電極損失が急激に増大し伝送線路の損失が増大することに因る。例えば、伝送線路の電極材料としてNb を用いた場合、1 波長当たり入力信号に対して 60%以上減衰する。このように、20 年以上前から確立されてきたSISミキサの作製技術をそのままスケールダウンさせて当周波数帯に適用することはできない。また、SIS 接合は構造的に大きなキャパシタンスをもつため、それを打ち消すための共振構造が必要になる。この場合、その帯域は ωRC で制限されるため、比帯域 19%以上が要求されるBand 10 周波数帯域をカバーするためには、SIS 接合の臨界電流密度 J_c は 15 kA/cm^2 以上が必要であると指摘されてきた。これはSIS 接合にNb/ AlO_x /Nb を用いた場合、絶縁層 AlO_x の厚さが数nm程度という極端に薄いSIS接合が必要である。高い臨界電流密度は、接合品質を保ったまま実現することは現在の作製技術では困難である。したがって、当周波数帯では伝送線路の電極材料を変え、設計手法を見直すという研究開発要素が必要となる。

これらの技術的困難を解決するために、作製および設計的アプローチの両方から詳細な調査を行い、テラヘルツ帯にギャップ周波数を有する超伝導体・窒化ニオブチタン(NbTiN)を用いたミキサの開発を進めてきた。本研究はALMA Band 10 の厳しい受信機仕様を満たすために、SIS ミキサの広帯域化および低雑音化の実証を目的としている。

第 1 章では序論として、本研究の背景、重要性とその目的について述べた。

第 2 章では、SIS ミキサの設計や解析を行うため、ミキシング原理と超伝導高周波伝送理論を解説した。SIS 接合を用いたミキシングの原理は、Tucker と Feldman によって確立されており、準粒子トンネル電流に起因する非線形電流電圧特性と、一般的なダイオードのミキシング理論を組み合わせている。また、超伝導マイクロストリップラインをモデリングするためには、超伝導の表面インピーダンスを計算する必要がある、これには Mattis-Bardeen 理論に基づいた超伝導の複素導電率を適用した。

第 3 章ではSIS接合およびマイクロストリップラインに用いる電極材料として様々な組み合わせを検討し、選定を行った。当周波数帯では、高い変換利得の得られるSIS接合と低い伝送損失の得られるマイクロストリップラインが必須であり、最終的に、Nb/ AlO_x /Nb 接合とNbTiN/ SiO_2 /Alマイクロストリップラインの組み合わせが最も有望であることを理論的計算から確認した。またNbTiN膜の低損失化を図るために最適な作製条件の調査を行った。さらにSISミキサの作製プロセスの説明をした。

第 4 章では、Nb/ AlO_x /Nb接合+NbTiN/ SiO_2 /AlマイクロストリップラインをMgO基板上に作製したミキサの特性を実験的に調査した。このミキサはMgO基板上でNbTiN膜がエピタ

キシャル成長し、理想的な超伝導特性が得られること利用したもので、世界的にも初めての構造である。一方、MgOは10程度の比較的高い比誘電率をもつために電磁波の伝搬損失の一因である基本モードのIFポートへのリークや高次モードが発生しやすくなる。したがって、設計には25 μm という薄い基板厚とIFポートへのリークを強力に抑圧するためにハンマーフィルタを適用した。作製したミキサ素子は0.83 THzにおいて171 Kという非常に低雑音な性能を示した。これは、超伝導伝送線路が非常に低損失で働いていることを実証するものである。一方、詳細な解析により、Band 10に用いるミキサとしては回路的にさらなる改善が必要であることを明らかにした。

第5章は、本博士論文の中心となる部分であり、Nb/AIO_x/Nb接合+ NbTiN/SiO₂/Alマイクロストリップを熔融石英基板上に作製したミキサの特性を詳細に測定・解析した。熔融石英は従来から使用されてきた基板で扱いやすいが、NbTiN膜は多結晶成長し、その特性がスパッタ条件に依存しやすい。このため、第3章で説明した最適化条件で作製したNbTiN膜を用いた。

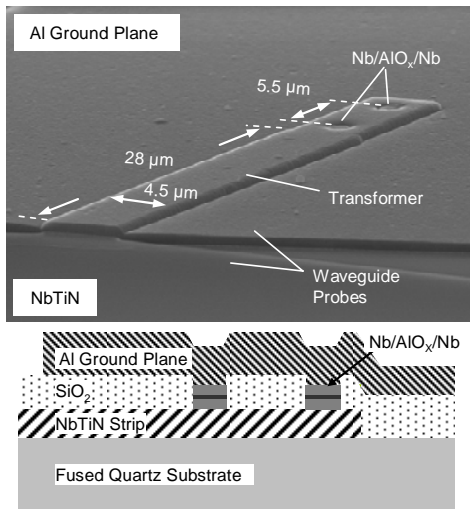


図3 ミキサの同調回路部分の走査型電子顕微鏡写真と断面構造

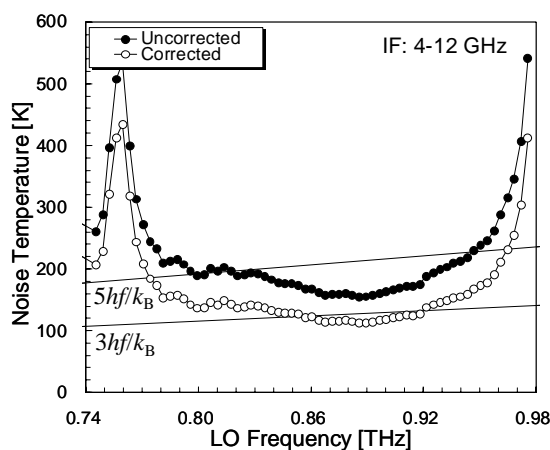


図4 2 Kにおける受信機雑音温度。測定には真空窓として500 μm のテフロンとビームスプリッタとして8.5 μm のポリイミドフィルムを用いた。

また、伝送線路にはグラウンド電極をAl、ストリップ導体にNbTiNを用いた反転型マイクロストリップラインを適用して低損失化を図った(図3)。SIS接合に関しては、これまで、臨界電流密度 J_c は15 kA/cm^2 以上が必要であると考えられてきた。そのような高い J_c の接合は一般に接合品質の劣化を招き、現状の作製技術では困難である。したがって、 J_c が10 kA/cm^2 程度のSIS接合に対して、低雑音特性を保ったまま広帯域化が可能かどうかを設計的なアプローチから検討した。具体的には、共振回路を固定し利得と雑音が信号源アドミタンスにどのように依存するかを解析した。この結果、ミキサの雑音最小と利得最大になるインピーダンスが異なることが判明し、広帯域・低雑音特性を同時に満足する解が存在することがわかった。この解析に基づいて作製したミキサを測定したところ、ALMA band 10の受信機仕様を満たしうる低雑音広帯域特性を実証することができた。また、物理温度2 Kにおける雑音性能を測定し、3倍の量子雑音に相当する120 Kという世界最高性能の超低雑音特性を示し、開発に成功した(図4)。

第6章では4-12 GHzという広帯域なIF系回路に関して、IF雑音および出力特性の平坦度の改善方法を検討した。当周波数帯で低雑音化の妨げとなっていた原因のひとつはIF雑音温度とミキサの利得低下である。我々の解析ではIF雑音の寄与は全受信機雑音温度の20-30%程度を占める。したがって、高いミキサ利得とできるだけ低いIF系の雑音温度が求められる。しかしながら、4-12 GHzという1オクターブ

を超えるバンド幅でこれを満たすように IF 特性を保つことは非常に困難であった。高いミキサ利得はミキサの 200 Ω 以上の高い出力インピーダンスによって得られるが、そのようなインピーダンスは 50 Ω の特性インピーダンスをもつ IF 系とのマッチングを難しくする。これを解決するためにミキサと IF 系とのインピーダンス特性を詳細に調査し、どのような IF 回路が適当であるかを検討した。解析の結果、アイソレータの入力リターンロスの改善が、受信機雑音温度および出力特性の改善に効果的であることを見出した。これにより IF 特性に関して、ALMA の仕様を満たす特性を得ることができた。

第 7 章では導波管型 10 dB カプラを一体化したミキサブロックの開発について説明した。導波管コンポーネントはミリ波帯では広く用いられているが、当周波数帯では大きな損失が発生することが問題となっていた。まず、長さ 25 mm の導波管を用いて冷却時の損失を評価した。その結果 1.2 dB の損失が生じることがわかった。この損失はミリ波帯で使用されているような長さ 30 mm の導波管を持つモジュラータイプの導波管カプラを使用した場合、30 % 程度雑音温度が上昇してしまう。したがって、10 dB カプラをミキサブロックに一体化することでフランジでの mismatch を避け、導波管をできるだけ短くすることにより低損失化を図った。第 5 章で開発した SIS ミキサを実装して雑音温度を測定した結果、ALMA band 10 の仕様を満たす結果を始めて実証した。

第 8 章では本研究で得られた主要な成果と今後の展開をまとめた。

審査結果の要旨

本論文はテラヘルツ電波領域における天体等からの微弱な電波観測を行うための低雑音かつ広い周波数範囲で使用可能な受信機を、新規で独創的な方法で達成したものであり、その内容は以下の通りである。

高感度の電磁波検出を行なう場合には、検出素子を極低温まで冷却することが本質的に重要である。特に超伝導素子は、量子力学的に許される極限の高感度を実現できる可能性がある。現在までに超伝導トンネル接合(SIS)の準粒子電流の非線型性を利用したミリ波テラヘルツ波ミキサは超低雑音かつ高能率性が実証され、既に電波望遠鏡に搭載されている。しかしながら、本論文の研究対象となっている 0.7THz 以上の周波数帯域では、本研究のターゲットとしている量子限界の 5 倍以下には到底達していなかった。目標値の量子限界の 5 倍は電波天文分野の国際プロジェクトである ALMA 干渉計のスペックであり、国際的にも達成が注目されていた。

本研究では、まず SIS 接合としては雑音の原因となるリーク電流が低い Nb/AlO_x/Nb 接合と低損失な NbTiN/SiO₂/Al マイクロストリップラインが最も良い組み合わせであることを突き止めた。さらにそれらを構成する基板としては、熔融石英基板が他の基板(MgO)等より優れている事を見出した。また、従来から言われていた SIS 接合の広帯域周波数条件 $\omega RC \sim 4$ (ω : 角周波数、R : 接合の抵抗、C : 接合の容量)についての認識を抜本的に変革し、臨界電

流密度を大きく上げなくても性能をあげる解を見つけた。これらの条件を満たすSISミクサを設計することにより周波数帯域 0.78~0.95THz (ALMA Band10) において雑音量子限界の 5 倍以下に下げることにより世界で初めて成功した。

以上の様に、本論文は、テラヘルツ領域における低雑音ミクサに対して、独自の方式を考案し、実現したことは傑出した成果であり、高く評価できる。

さらにこの手法は電波天文学に限らず、分子分光学、プラズマ診断、リモートセンシング、通信工学等幅広い応用が期待される。

以上のとおり、本学位論文は当該研究分野におけるいくつかの新規な発見を含んでおり、それらは既に学術雑誌に複数の論文として公表し、関連の学会において確かな評価を得ている。本委員会は、学位論文として十分な内容を有しているものと判断した。