

論文内容の要旨

論文題目 : Developmental Study on an NbTiN HEB Mixer for Astronomical Applications

(天体観測のための NbTiN HEB ミクサの開発研究)

氏名 新保 謙

1. はじめに

周波数 300 GHz から 3 THz (波長 1 mm から 0.1 mm) の電磁波はサブミリ波と呼ばれ、近年、宇宙観測において注目されている帯域である。なかでも、テラヘルツ帯 (1 THz 以上) は未開拓な領域として残されている。この領域には、星間雲の物理的、化学的な状態を調べる上で重要な役割が期待される C^+ 、 C 、 O 、 N^+ などの微細構造遷移輝線や、 CO 分子の高励起回転スペクトル輝線などが存在する。また星形成領域近傍などの高密度領域の化学組成を調べる上で鍵となる CH 、 OH 、 H_2D^+ 、 HD_2^+ などの基本的な分子の放射が存在する。テラヘルツ帯の宇宙観測は、これまで漠然と捉えられてきた基本的星間現象の理解を大きく促進するものと考えられる。

しかし、テラヘルツ帯の宇宙観測はこれまで非常に限られている。その主な原因は、テラヘルツ帯における受信機技術が未成熟な点である。ミリ波帯、サブミリ波帯では、 Nb を用いた SIS ミクサ受信機が広く使われているが、700 GHz 以上の周波数では Nb 自体の吸収による損失のため性能を発揮できない。従って、新しい原理に基づく受信機開発が不可欠であり、世界的競争が繰り広げられている。

超伝導ホットエレクトロン・ボロメータ(HEB)ミクサは、テラヘルツ帯でのヘテロダイン検出器として最も期待されているものである。HEB ミクサは超伝導体による電磁波の吸収を利用してミクサ動作を行うもので、SIS ミクサと異なり動作可能な上限周波数が原理的に存在しない。本学位論文の目的は、テラヘルツ帯における宇宙観測に用いることができる HEB ミクサ受信機を開発することである。

2. NbTiN を用いた HEB ミクサの開発

超伝導 HEB ミクサは、数 100 nm スケールの大きさの超伝導体薄膜細線を回路内部に含んだ構造を持っており、その製作にあたっては、1 μ m 未満の微細構造の製作、高品質の超伝導薄膜の成膜などの要素技術の確立が不可欠である。そこで、まず、HEB ミクサ素子製作に最適化した専用装置群（電子線描画装置、複合成膜装置、エッチング装置など）を導入し、その立ち上げと較正実験を行った。微細構造の製作は SEM を用いた電子線描画システムで行う。HEB ミクサの製作では、微細構造を正確に重ね合わせるが必要となるが、そのために必要な重ね描画の技術を確認した。具体的には、下層のマーク図形を自動認識して、位置ずれを検出し、それを補正して上層の描画を行うシステムを開発した。これにより、200 nm 程度の精度での重ね描画ができるようになった。

本研究では、超伝導体として高い超伝導転移温度($T_c > 15$ K)をもつ NbTiN に着目した。NbTiN 薄膜は NbTi をターゲットとした反応性スパッタによって成膜する。その品質は、バッファガスに含まれる N_2 の量に敏感に依存することがわかった。このことは膜厚が薄い場合に顕著であり、成膜条件の最適化は薄膜について行う必要があった。最終的に、膜厚 5 nm で $T_c = 9.8$ K を実現し、HEB ミクサ製作に十分な質の NbTiN 薄膜を得ることが可能となった。またこの過程で、NbTiN 薄膜の R - T 曲線が膜質によって顕著に異なることを見出した。これは薄膜の構造に関係していると見られ、抵抗測定という簡便な手法で薄膜の物性を評価しうる可能性を与えた。

これらの地道な実験を通して、NbTiN を用いた HEB ミクサ素子の製作が可能になった。製作は、Au、Ti、NbTiN の三層一体成膜と、リフトオフ法-エッチング法を併用した構造形成からなる独自のプロセスで行った。

3. HEB ミクサの評価

製作した HEB ミクサ素子は液体ヘリウムによる冷却試験で良好な DC 特性を示した。さらに、このミクサ素子を導波管ミクサブロックに搭載して機械式冷凍機を用いて 4 K まで冷却し、810 GHz において性能評価を行った。この冷凍機は可搬型望遠鏡の受信機として設計されたものであり、液体ヘリウム冷却による性能評価と比べてより宇宙観測への応用に近い環境での測定である。

HEB ミクサは機械式冷凍機による冷却でも良好な超伝導特性を示し、またこの特性は 4 回の冷却サイクルで再現性を示した。810 GHz の局部発振源(LO)を用いて Y-factor 法による雑音温度の測定を行ったところ、最高で Y-factor 0.7 dB, 受信機雑音温度 1200 K (DSB) を記録した。この値は 800 GHz 帯における既存の報告例と比べて最高ではないものの、諸条件を考えれば遜色は無く、観測への適用を見据えた環境での結果として特筆できるものである。

HEB ミクサの動作範囲を詳しく調べるため、バイアス電圧、局部発振電力に対する依存性を測定した。同じ温度においてバイアス電圧、局部発振電力を幅広く変化させて測定し

た結果、受信機性能は局部発振電力の微小な変化に対して鋭敏に変動し、一方でバイアス電圧の変化には比較的鈍いことが明らかになった。このことから、局部発振電力の制御が安定な動作のために不可欠であることがわかった。

また冷凍機の温度を少しずつ上げてミキサ性能の温度依存性の測定を行った。その結果、4.0 K から 7.5 K 程度までは、局部発振電力を調整してバイアス電流を最適化することにより、ほぼ一定の性能を与えることがわかった。一方、7.5 K 以上では、性能は急速に悪化する傾向が見られた。このことは、HEB ミキサの性能は、4 K 付近において、温度に極端に敏感ではないことを意味する。これは宇宙観測を考えたとき実用上、大きな利点と言える。性能の温度依存性は、古典的な HEB ミキサ理論と矛盾しない。即ち、温度を上げる効果と局部発振電力を加える効果は超伝導の破壊という点で同等であり、ミキサ性能に同様に寄与することが示された。

今後、NbTiN 薄膜の膜厚を薄くすること、HEB ミキサの入力回路のインピーダンス整合を図ることなどによって、性能向上が期待される。

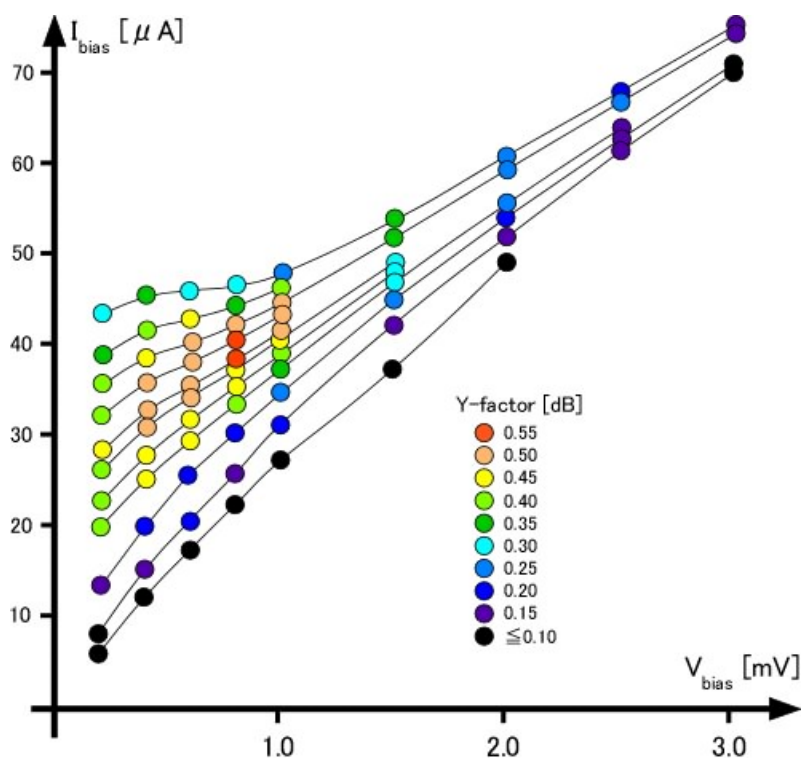


図 1 : 製作した HEB ミキサ素子の Y-factor の I-V 平面における分布

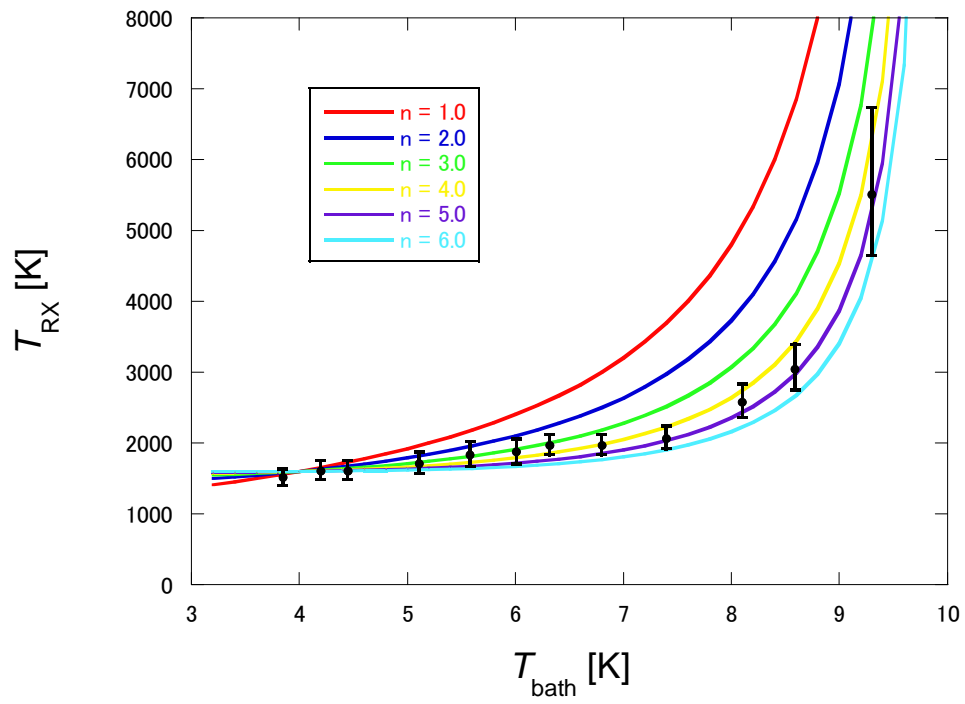


図 2 : 製作した HEB ミクサ素子の受信機雑音温度の冷却温度に対する依存性、および古典的モデルに基づくフィッティング ($T_c = 10.0 \text{ K}$ と仮定)