

論文内容の要旨

Development of a low noise HEB mixer receiver for spectroscopic observations in the THz band

(THz 帯分光観測のための低雑音 HEB ミクサ受信機の開発)

氏名：椎野竜哉

1. はじめに

THz 帯 (1~10 THz) の電磁波は遠赤外領域とサブミリ波領域の間に位置し、エレクトロニクスとフォトニクスのどちらにとっても技術的フロンティアとなっている。そのため、これまで利用が遅れてきたが、近年の急速な技術進歩によって、工学、医学、理学の様々な基礎・応用分野で注目されるようになってきた。電波天文学においてもこの領域の観測に対する関心は高まりつつある。

THz 帯には、星間分子雲中における分子形成の要となる基本的な原子や分子のスペクトルが多数あり、これらの観測により、星間雲の化学進化の根幹を捉えることができると期待されている。2010 年に打ち上げられた Herschel 宇宙望遠鏡は THz 帯でのパイオニア的観測を数多く行い、新しい星間分子を多数発見するなど、この領域での分光観測の重要性を改めて示した。THz 帯は大気の吸収が激しく、地上からの観測は難しい。しかし、0.8-1.0, 1.3-1.5 THz 帯にはわずかに大気の窓があり、高所に設置した大口径望遠鏡で高空間分解能観測が可能である。本学位論文では、このような地上からの THz 帯分光観測を念頭におき、THz 帯の低雑音受信機の開発を行った。

THz 帯で最も有望なヘテロダイン検出素子は、HEB (Hot Electron Bolometer) ミクサである。HEB ミクサの心臓部は数 nm 程度の厚みの超伝導細線である。そこに局部発振(LO: Local Oscillator) 信号と宇宙からの信号 (RF) を同時に入射すると、それらの差周波 (中間周波数 IF: Intermediate Frequency) の周期で超伝導の破壊による電気抵抗変化が生じる。それを電流変化として取り出すことで THz 帯の信号を周波数変

換して検出できる。ここで、超伝導の破壊で生じた熱電子を素早く冷却することが低雑音化、IF帯域の拡張のために重要である。その冷却機構には、電子-格子相互作用を利用して格子振動を介して基板に熱を逃がす格子冷却と、熱電子を常伝導金属の電極に拡散させる拡散冷却がある。前者では電子-格子相互作用の大きいNbNやNbTiNが使われ、後者では電子の拡散係数が大きいNbが用いられる。また、HEB素子と電磁波の結合方法には導波管型、準光学型の2つがある。導波管型には使用できる基板が石英にほぼ限られるという制約があるが、ビーム形状が厳密に計算可能である点で天文観測用途に非常に適している。本研究室では10年前より格子冷却型の導波管HEBミクサの開発を進めており、12 nmの厚みのNbTiNを用いて、0.8 THz帯で500 K、1.5 THz帯で1700 Kと、ある程度の性能を達成してきた。格子冷却型HEBミクサでは、超伝導薄膜の膜厚を薄くすることが本質的と考えられており、他のグループの素子に比べて2-4倍の膜厚で上記の性能が得られたことは意外であった。本研究ではこの理由を追求するとともに、より低雑音な実用的HEBミクサ受信機を開発することを目指した。

2. AlN 緩衝層を用いた HEB ミクサの開発

超伝導薄膜の成膜にはスパッタ法を用いる。スパッタで成膜された超伝導薄膜は一般に、薄くするに従って超伝導転移温度 (T_c) が低下し、我々の装置ではミクサに最適とされる数 nm 厚の NbTiN 薄膜は製作できなかった。そこで、良質な超伝導薄膜を得るために、単結晶 AlN 膜を石英基板と NbTiN 薄膜との間に緩衝層として導入し、NbTiN の T_c を上昇させることを考えた。AlN 薄膜は窒素雰囲気中で Al をスパッタして成膜した。この際、スパッタ条件を最適化すると単結晶 AlN 薄膜が得られる。この AlN 膜を緩衝層として用いると、8 nm の NbTiN 薄膜で 7.9 K から 11.1 K に T_c が上昇することがわかった (図 1)。また、NbTiN と同じ結晶構造を持つ NbN についても同様に緩衝層を使用し、同程度の T_c の上昇を得た。

AlN は六方晶系の Wurtzite 構造であり、NaCl 構造の NbTiN や NbN とは一見格子マッチングが悪い。しかし、AlN の 001 面が NbTiN や NbN の 111 面に非常に近い原子間隔になっており、そのため AlN が緩衝層として有効に働くことが考えられる。実際に AlN の結晶性を悪化させると、 T_c の改善幅が急激に下がることがわかり、この考えが実験的に裏付けられた。

AlN 緩衝層の導入により 4 nm 程度の膜厚でも HEB ミクサの製作が可能になった。そこで、NbTiN/AlN 薄膜、また、NbN/AlN 薄膜を用いた HEB ミクサを製作し、性能

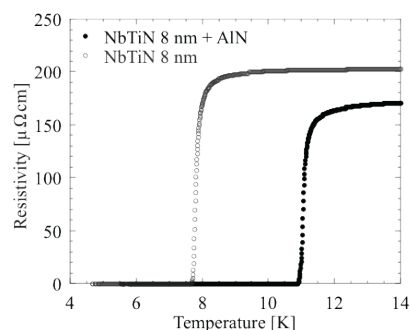


図 1 NbTiN, NbTiN/AlN の R - T 曲線

評価を行った。NbTiN/AlN ミクサでは良い結果が得られなかったが、NbN/AlN ミクサでは 6 nm の NbN 薄膜を用いたミクサで、0.8 THz で 450 K、1.5 THz で 1100 K という雑音温度を達成した。これは他のグループの結果と比肩する雑音性能である。これまで導波管型の HEB ミクサには基板選択上の制約から通常 NbTiN が用いられてきた。しかし、AlN 緩衝層を用いれば、石英基板上に良好な NbN 薄膜を形成でき、それを用いて導波管型 HEB ミクサが実現できることを示したことは、HEB ミクサの開発自由度を拡げる意味で大きな意義がある。また、原因は不明であるが、ミクサ雑音が超伝導細線のサイズ（縦×横）に顕著に依存しており、低雑音化にはそれらの最適化が非常に重要であることを明らかにした。

3. 拡散冷却を併用した格子冷却 HEB ミクサの開発

このように、6 nm まで薄膜化した超伝導膜を用いて HEB ミクサを製作し、一定の性能を得たが、一層の低雑音化は困難であった。そこで、薄膜化だけが低雑音化の鍵ではないと考え、比較的厚い NbTiN 薄膜を用いて HEB ミクサを製作した。NbN/AlN ミクサの開発において、超伝導細線のサイズ（縦×横）が雑音性能を大きく左右することがわかっていたので、NbTiN を用いた HEB ミクサにおいても様々なサイズで性能を比較した。その結果、厚さ 10.8 nm、細線長さ 0.2 μm 、細線幅 1.5 μm の 0.8 THz 帯ミクサで 350 K という性能が得られた。これは量子雑音の約 9 倍で、この周波数帯では世界レベルの低雑音ミクサである。また、同様に 10.8 nm の薄膜を用いた 1.5 THz 帯ミクサで 490 K を達成した。これは量子雑音の約 7 倍であり、世界一の低雑音性能である（図 2）。このミクサの長さは 0.15 μm 、幅は 1.0 μm であった。格子冷却だけを考えると、この細線厚みでの雑音性能は説明できない。そこで、冷却のメカニズムを調べる実験を行った。

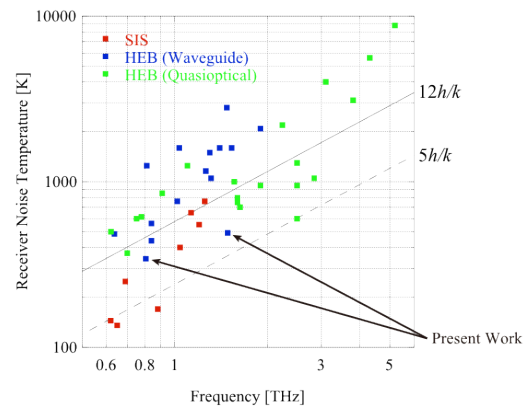


図 2 受信機雑音性能の比較

超伝導の破壊で生じる熱電子の冷却時間 (τ_{mix}) は、中間周波 (IF) 利得帯域幅の測定から調べることができる。IF 利得帯域幅は変換効率が 1/2 になる IF 周波数で定義される。実験的に求めた IF 利得帯域幅 (f_0) から electrothermal feedback の効果を補正した利得帯域幅 (f_θ) から冷却時間が求められる。

$$f_\theta = \frac{1}{2\pi\tau_\theta} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{\tau_{\text{ph}}} + \frac{1}{\tau_{\text{diff}}} \right)$$

ここで τ_{ph} は格子冷却による冷却時間、 τ_{diff} は拡散冷却による冷却時間である。 τ_{diff} は細線の長さ (L) に依存するが、 τ_{ph} は依存しないため、異なる細線長について f_{Θ} を測定して τ_{diff} と τ_{ph} をそれぞれ求めた。ここで、 τ_{ph} は電子温度に依存するが、本研究では簡単のために、熱浴の温度を上昇させ、 I - V 曲線が動作状態と同じバイアス点を通る時の熱浴の温度を近似的な電子温度とみなし、議論を行った。測定されたバンド幅、及び見積もられたそれぞれの冷却時間を以下に示す。

L [μm]	f_0 [GHz]	f_{Θ} [GHz]	τ_{mix} [ps]	τ_{diff} [ps]	τ_{ph} [ps]
0.15	1.64(0.06)	4.01(0.11)	39.6	54.3	147.1
0.20	1.67(0.06)	3.33(0.13)	47.8	96.5	94.6
0.24	1.26(0.05)	2.45(0.06)	64.9	139.0	121.8

これらの値から、0.20 μm より短い細線の場合、熱電子はむしろ拡散によって冷却されていることがわかった。上記の他に、我々のシステムで製作可能な限界に近い 0.1 μm の長さのミクサを製作したところ、実測で 3 GHz を超える利得帯域幅が得られた。本来 NbTiN は格子冷却型であるが、細線を短くすることで拡散冷却が有効になる。我々が極めて低雑音な HEB ミクサを製作できたのは、拡散冷却により変換利得が上昇し、IF 系の雑音下がったため、また、細線サイズの最適化によりミクサ雑音下がったためであると考えられる。

4. ASTE 10 m 望遠鏡での試験観測

本研究で開発した低雑音 HEB ミクサを使って ASTE (Atacama Submillimeter Telescope Experiment) 10 m 望遠鏡に搭載する受信機を設計・製作した。周波数帯域は H_2D^+ や HDO などの重要なスペクトルが多数ある 0.8-0.9, 1.3-1.5 THz である。光学系はガウス光学を使って設計し、ビームサイズが 0.9 THz で 7.8", 1.35 THz で 6.5" となるよう主鏡の内側 7-8m の領域のみを使用した。

LO 信号はデュワーの外から準光学的にデュワー内に導き、ワイヤグリッドで RF と結合した。2011 年夏にこの受信機を実際に ASTE 望遠鏡に初めて搭載し、試験観測を行った。月および木星からの連続波の受信に引き続き、Orion A 分子雲の方向で $^{13}\text{CO } J=8-7$ のスペクトルを検出した (図 3)。これにより、開発した受信機が天文観測に用いることができることが立証された。

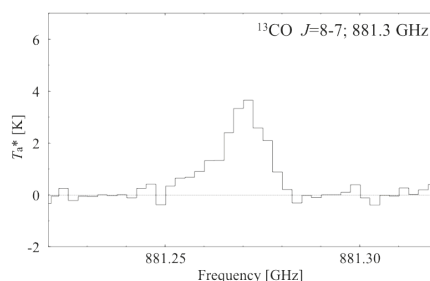


図 3 $^{13}\text{CO } J=8-7$ のスペクトル